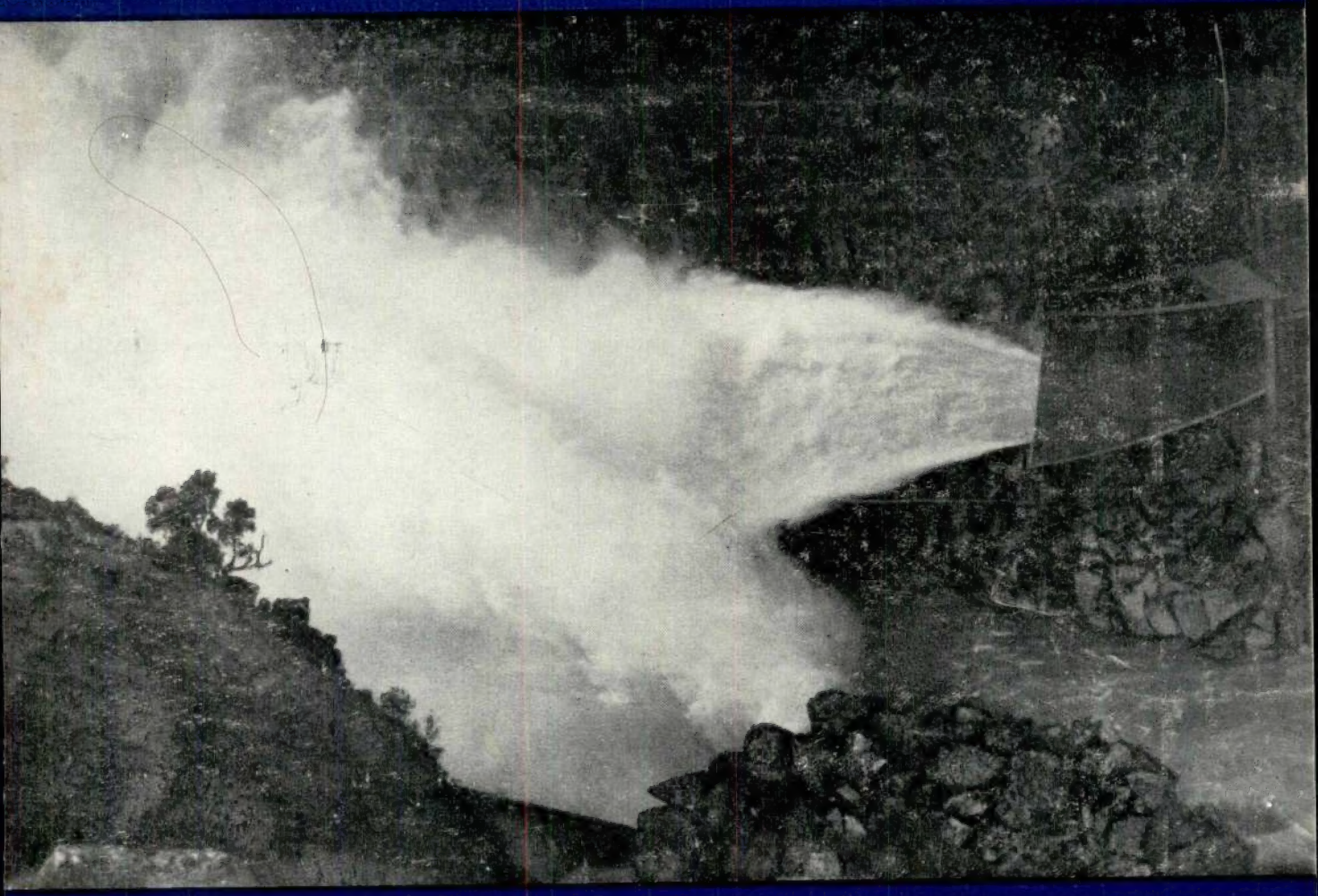
TÉCNICA



REVISTA DE ENGENHARIA
DOS ALUNOS DO I.S.T.

N.º 280-MARÇO-1958

CIMENTO SECIL

O CIMENTO PARA OBRAS DE GRANDE RESPONSABILIDADE

4 fornos rotativos — 300.000 toneladas anuais

Fábrica no Outão — Setúbal

Lisboa — Rua do Comércio, 56-3.º

ELECTRO-ARCO
LIMITADA

ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 683649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 — TEL 21277

CAVAN

SOCIEDADE
PORTUGUESA

POSTES DE BETÃO PARA
LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA
ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

RUA D. ESTEFÂNIA, 42
TELEF. 47812-50129
LISBOA

TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA DOS ALUNOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Ano XXXII - N.º 280 Março de 1958

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * LISBOA-N. * TELEF. 77 01 44 (Linha 50)

DIRECTOR

CARLOS MANUEL DE MEDEIROS PORTELA

ADMINISTRADOR

RICARDO MANUEL SIMÕES BAYÃO HORTA

SECRETÁRIO

ALEXANDRE CERVEIRA

REDACTORES

ARTUR BAPTISTA
JOÃO MARTINS DE CARVALHO
JOÃO ULRICH
JORGE FONTAINHAS
LUÍS AIRES BARROS

NUMERO AVULSO 12$50

ASSINATURAS:

	3 N.os	5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	32$50	50$00	95$00
Ultramar Português e Espanha	—	55$00	100$00
Estrangeiro	—	80$00	110$00

EDITOR E PROPRIETÁRIO

ASS. DOS ESTUD. DO I.S.T.

COMPOSTO E IMPRESSO NA

Tip. JORGE FERNANDES, L.DA

RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

SUMÁRIO

CAPA — Saída dos túneis evacuadores de cheias do Cabril, em funcionamento.

Págs.

Energia nuclear e sua utilização
Pelo Dr. Carlos Cacho 379

Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos
Pelo Eng.º A. de Sousa Coutinho 395

Determinação do valor de filões
Pelo Eng.º Fernando de Melo Mendes 437

Enquadramento do transistor na teoria dos Quadripolos lineares
Pelo Eng.º J. Mariano Jervis Pereira 443

Notas informativas — **Elementos sobre a produção e consumo de energia na rede eléctrica nacional** 466

Lamínadores desbastadores
Pelo Eng.º João H. Botelho Cardoso 467

Conclusões do II Congresso dos Economistas Portugueses e do II Congresso da Indústria Portuguesa . . . 476

Biblioteca 479

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

Índice Alfabético dos nossos anunciantes

Pág.

A

Agência Geral de Material Eléctrico, Ltd.ª VII
A. Gestetner XIII
Atlantic — Fábrica Lusitana de Tintas e Vernizes, Limitada XXXIII
António Baró XLI
Azevedo & Pessi, Ltd.ª XL

B

Bouhon & Irmão, Ltd.ª XLI

C

Centrozap XXXI
Centro de Cooperação Técnica . . . XXIII
Ceresit XLIII
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos . . IV
Companhia Portuguesa de Fornos Eléctricos XIV
Companhia União Fabril XVIII
Construções Técnicas, Ltd.ª XI
C. Santos, Ltd.ª . . . . . VIII e XXXVIII

E

Edmond Dardel II
Electro-Arco, Ltd.ª . . . . . 2.ª da capa
Emílio de Azevedo Campos & C.ª, Ltd.ª XIX
Empresa Electro Cerâmica VI
Empresa de Produtos Asfálticos . . . XIII
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa
Eng.º Antunes Ferreira XLIII
Eng.º Augusto Cavaco XL

F

Fábrica Metalúrgica e Construtora CARAVELA, Ltd.ª XXXIV
Fábrica Portugal X
Facto, Lda. XXII

G

General Electric Portuguesa XXVI

H

Harker Sumner & C.ª, Ld.ª XLI
Henriques & Castro, Ltd.ª XI
Henry Wiggin XVI
Horácio Alves XL

I

INEL XXVII

Pág.

J

Jayme da Costa, Lda. XXV
J. B. Fernandes & C.ª, Lda. XX
J. Nascimento Cordeiro XXVI

L

Leacock (Lisboa), Ltd.ª XV
Lusinstal XXXVII

M

Mabor XXXIX
M A N XXX
Máquinas de Precisão, Ltd.ª XXXVII
Monteiro Gomes, Ltd.ª XII

P

Papelaria Fernandes XXI
Pimentel & Casquilho, Ltd.ª III

S

Sabena XLIII
S. E. Moniz da Maia & Vaz Guedes, L.da XVII
SKF XXIV
SMEIA VI
Sociedade Comercial de Isolamentos de Cortiça XXXII
Sociedade Construtora Portuguesa, Ltd.ª I
Socony-Vacuum Portuguesa . . . . 4.ª da capa
Sociedade Electrom XXXIX
Sociedade Fabril de Matérias Plásticas XXVIII
Sociedade Industrial Metalúrgica . XLII
Sociedade Portuguesa Cavan . . . . 2.ª da capa
Socotel V
Sofai XLII
Sondagens Ródio, Ltd.ª XIII
SOPECATE XXXIX
Sorefame XXXV
Spril XX
Standard Eléctrica IX

T

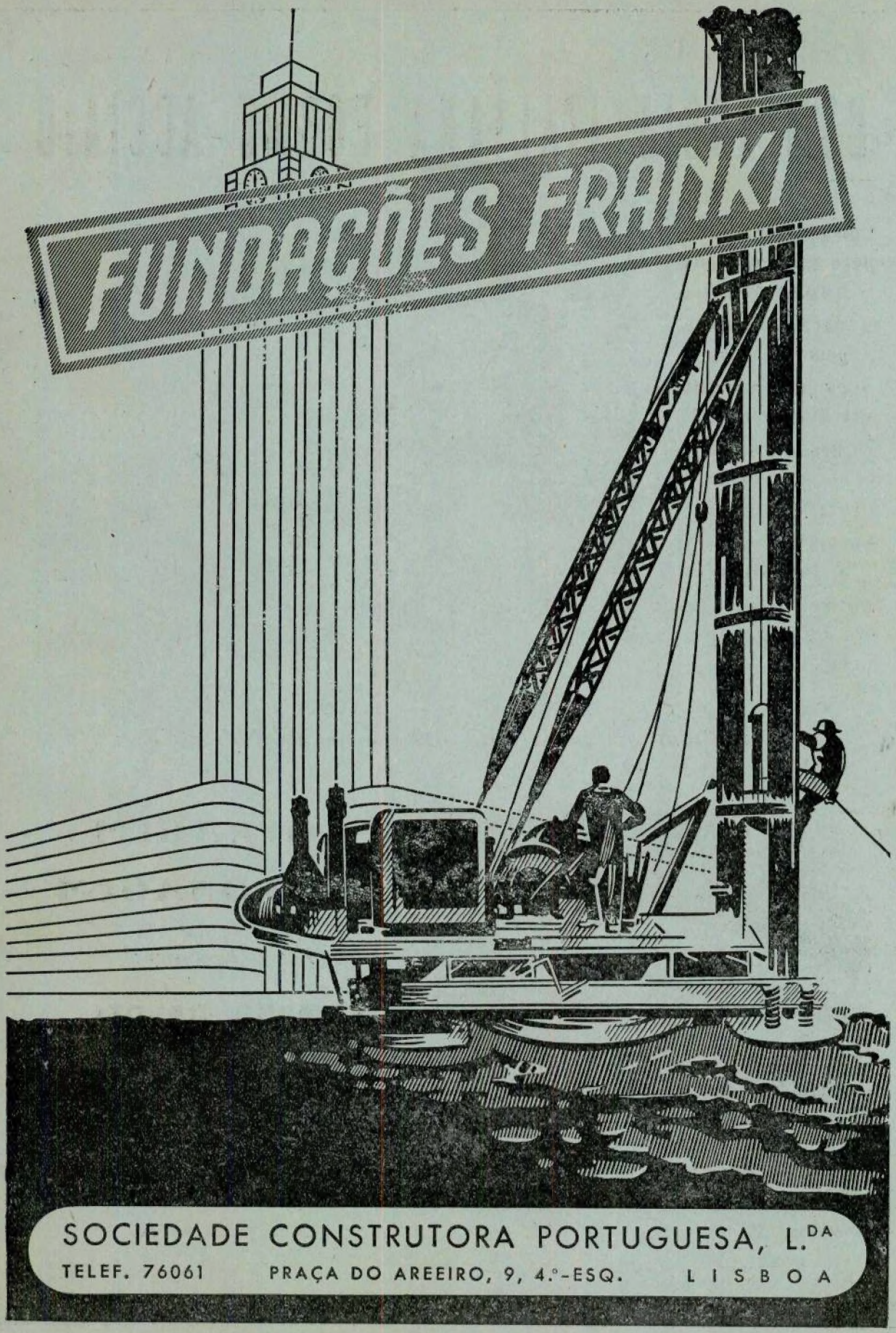
The Engineering Company of Portugal, Ltd. XXIX
Tintas Valentine XXXVI

U

Universal XLII

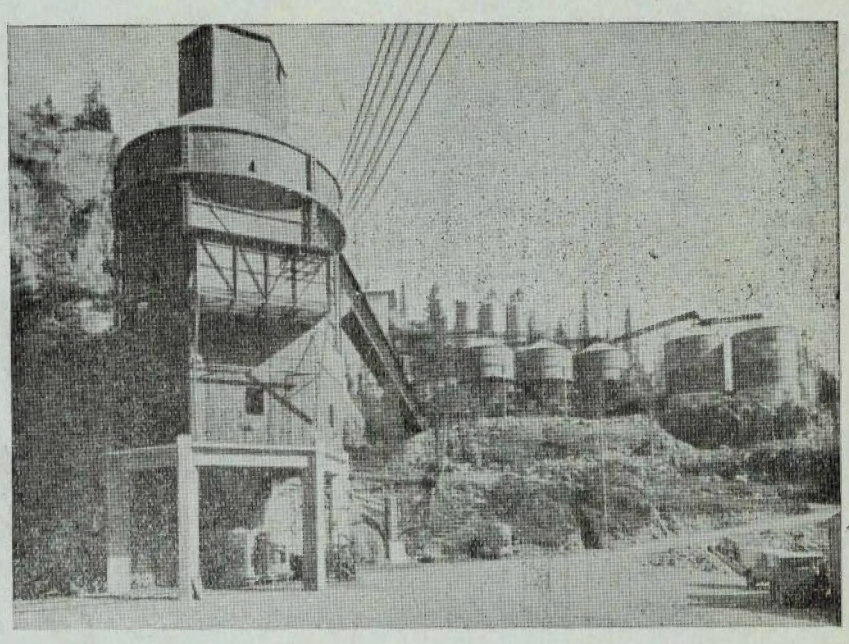
V

Vasco Pessoa, Lda. XX

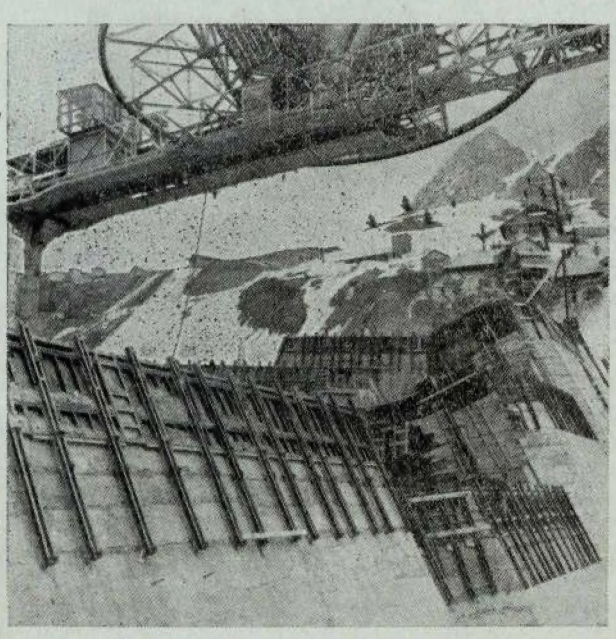

FUNDAÇÕES FRANKI
SOCIEDADE CONSTRUTORA PORTUGUESA, L.DA
TELEF. 76061
PRAÇA DO AREEIRO, 9, 4.º-ESQ.
LISBOA

COMPAGNIA ITALIANA FORME ACCIAIO

Cofragens metálicas para todas as construções de betão.
Centrais de dosagem.
Silos para cimento, cascalho, areia, etc.
Baldes para transporte de betão.
Pés de carneiro.
Elevadores verticais ou inclinados.
Alimentadores sem-fim para cimento, etc.



Consultem-nos para todos os vossos problemas de:



COFRAGEM E BETONAGEM

Agente Exclusivo:

EDMOND DARDEL

Engenheiro-consultor

RUA RODRIGUES SAMPAIO, 19-4.º B

Telefone 42289

LISBOA

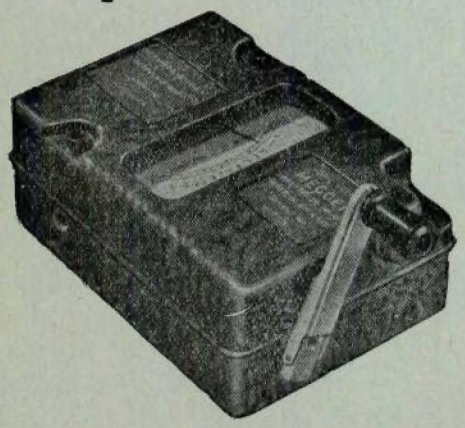
PIMENTEL & CASQUILHO, L.DA

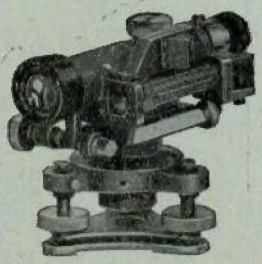
GRANDE SORTIDO
DE INSTRUMENTOS DE
PRECISÃO, CIENTÍFICOS
E INDUSTRIAIS

PARA

- ENGENHEIROS
- ARQUITECTOS
- CONSTRUTORES
- TOPÓGRAFOS
- DESENHADORES
- LABORATÓRIOS
- ESCOLAS
- OFICINAS

RUA DAS PORTAS DE SANTO ANTÃO, 75
LISBOA
TELEF.: 24314 • TELEG.: TECNA





O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 2 0464 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

EMPRESA ELECTRO CERÂMICA — S. A. R. L.

Candal — Gaia

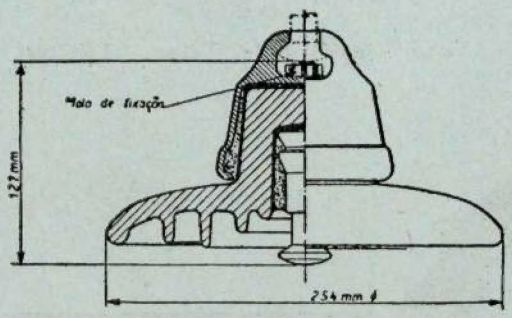
ISOLADORES DE CADEIA

Para suspensão

Tipo ACS 25

Este isolador é igual ao tipo I. B. S. 99 da firma inglesa Taylor Tunnicliff & Co., Ltd., por acordo com a qual o fabricamos

Peso aproximado: 4,3 kg cada elemento



Materiais

Porcelana vidrada em castanho.
Campânulas de ferro fundido maleável, galvanizadas por imersão a quente.
Hastes de aço macio galvanizadas por imersão a quente.
Molas de fixação de bronze fosforoso.

Sede — Largo Barão de Quintela, 3 — LISBOA

- **Redutores de velocidade normalizados**
- **Redutores de qualidade superior a preços vantajosos**
- **Entrega rápida**

A normalização

na fabricação dos redutores de velocidade significa:

1 Fabricação preliminar, em grandes séries, de «carters», rodas dentadas, e outras peças, do que resulta uma disponibilidade constante dos elementos necessários para uma montagem rápida do redutor desejado.

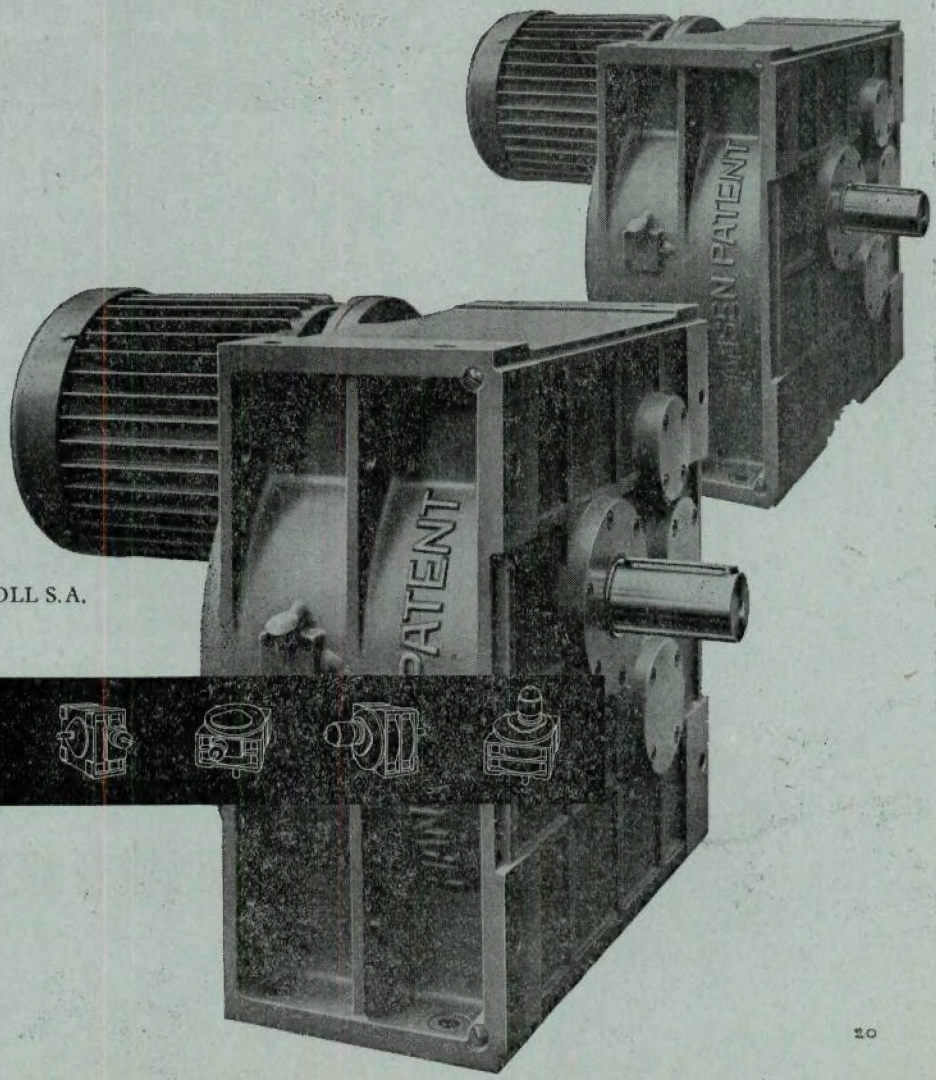
2 Os diversos elementos constituintes são intermutáveis mantendo-se a alta qualidade e precisão.

3 Entrega imediata das peças de reserva.

4 Possibilidade de efectuar uma fácil transformação dum tipo num outro.

Adaptação óptima a todas as exigências de trabalho, a pesar da normalização.

Os nossos técnicos estão à vossa disposição para escolher o tipo de redutor mais conveniente para cada caso.



DE ROLL

Société des Usines de Louis DE ROLL S.A.
Fábricas de Klus, Klus (Suiça)

Representantes em Portugal:
Socotel, Lda.
Rua de Sá da Bandeira, 651-4°, Esq.
Porto - Telef. 27013

20

CATERPILLAR

Caterpillar e Cat são Marcas Registradas de Caterpillar Tractor Co., dos E.U.A.

Obras do Metropolitano de Lisboa

SMEIA

Sociedade de Mecanização Industrial e Agrícola

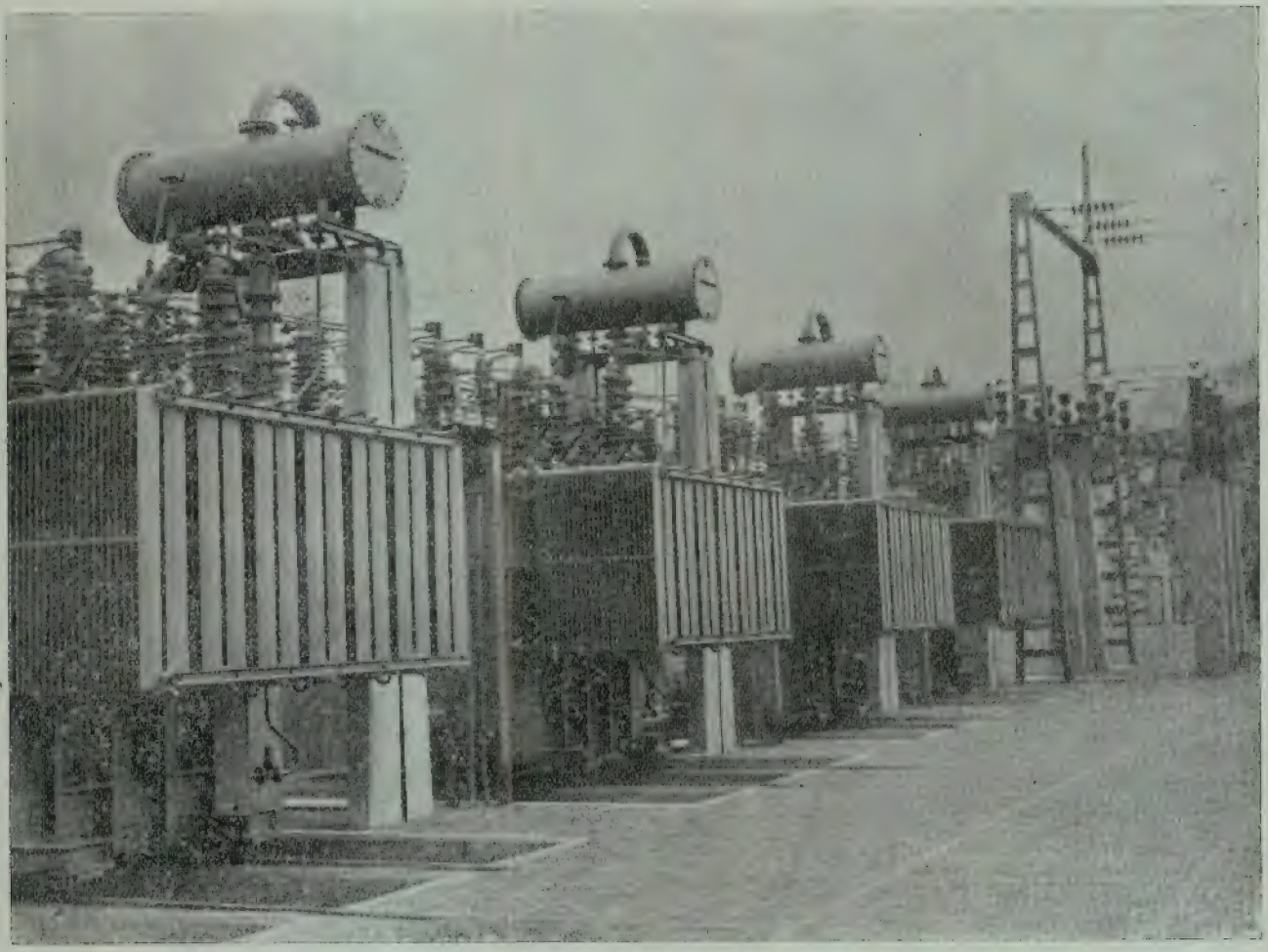
S. A. R. L.

Avenida Padre Manuel da Nóbrega, 8-B

72 40 53 LISBOA

SAVOISIENNE

Ateliers de Construction de Transformateurs de la Compagnie Générale d'Electricité de Paris



Quatro transformadores «Savoisienne», 4500 KVA — 60/6 KV

Central do Biópio (Angola)

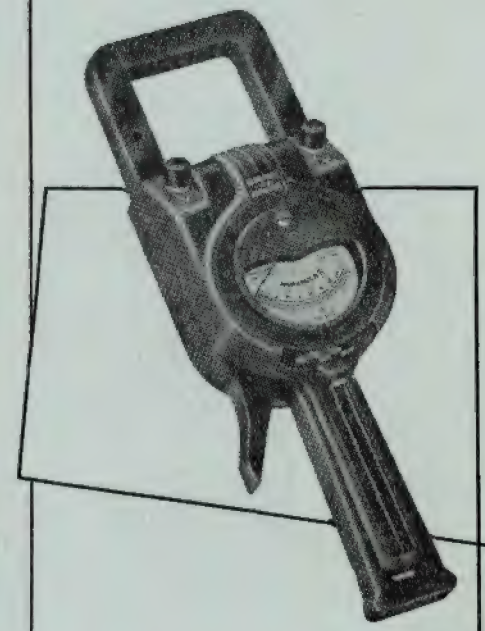
Ministério do Ultramar

DELEGADOS

AGÊNCIA GERAL DE MATERIAL ELÉCTRICO, L.DA

Rua dos INDUSTRIAIS, 4, 1.º (às Côrtes) // LISBOA // Telefs. 66 06 92 - 66 60 82 - 66 06 04

PINÇAS FERRANTI



PINÇAS VOLT—AMPERIMÉTRICAS

7 ESCALAS

EM AMPÈRES	EM VOLTS
0 – 10 AMPS.	0 – 150 V
0 – 25 »	0 – 600 »
0 – 100 »	
0 – 250 »	
0 – 1000 »	

PINÇA WATTIMÉTRICA

7 ESCALAS

0 – 3 KW
0 – 6 »
0 – 12 »
0 – 30 »
0 – 60 »
0 – 120 »
0 – 300 »

REPRESENTANTES:

C. SANTOS LDA.

29, AVENIDA DA LIBERDADE, 41 — LISBOA

DIVISÃO MARÍTIMA E TÉCNICA
T. DA GLÓRIA, 17—LISBOA
160, R. STA. CATARINA, 168—PORTO

Standard Electrica, S.A.R.L.

ASSOCIADA DA

"INTERNATIONAL TELEPHONE & TELEGRAPH CORPORATION"

NOVA YORK

PROJECTOS · FORNECIMENTOS · INSTALAÇÕES

- Instalações de comutação telefónica, manuais e automáticas, de todos os sistemas e capacidades. Sistemas de comunicações por fios em altas frequências;
- Materiais de transmissão automática, por fios e por rádio;
- Material de rádiocomunicações para todas as aplicações em média, alta, muito alta, e ultra-alta frequência;
- Sistemas de antenas para aplicações gerais e especiais para rádiocomunicações, rádiodifusão e televisão;
- Equipamentos de rádiodifusão e televisão e respectivo material de estúdio e acessórios;
- Sistemas de sinalização e de comando, automáticos e manuais, intercomunicadores, amplificadores e aparelhagem acessória;
- Cabos e acessórios de todos os tipos, para energia, comunicações e altas frequências;
- Rectificadores de selénio de tipos especiais e gerais para todas as aplicações.

SERVIÇOS TÉCNICOS, COMERCIAIS E FÁBRICA

AV. DA INDIA LISBOA

TELEFONES 63 8171/6

Fábrica Portugal

S. A. R. L.

LISBOA

MOBILIÁRIO METÁLICO

EM TODOS OS GÉNEROS

Instalações completas para :

Mobiliário moderno
para

ESCRITÓRIOS
ESCOLAS
BIBLIOTECAS

CLINICAS
HOSPITAIS
SANATÓRIOS
CINEMAS
HOTÉIS
ESPLANADAS

SALAS DE EXPOSIÇÕES :

Rua Febo Moniz, 2 a 20 — Praça dos Restauradores, 49 a 57
Avenidas da República e Elias Garcia — Rua da Graça, 82 e 84

PISCINA DO HOTEL ATLÂNTICO
ESTORIL

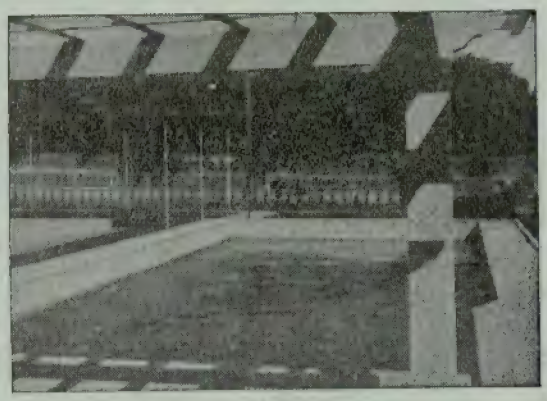
PETRIFICANTE E HIDRÓFUGO

À BASE DE CIMENTO

CEMPEXO

PINTURAS

PISCINA EM CARCAVELOS



DISTRIBUIDORES EM PORTUGAL

HENRIQUES & CASTRO, Lda.

AVENIDA CONDE DE VALBOM, 96 LISBOA

TELEF. 775057 - 775058

Construções Técnicas, L.da

Praça do Município, 13, 3.º
LISBOA — Telefones 22344
27809

Fundações

Construções Civis e Industriais

Betão Armado e Betão Pré-esforçado

Obras Públicas

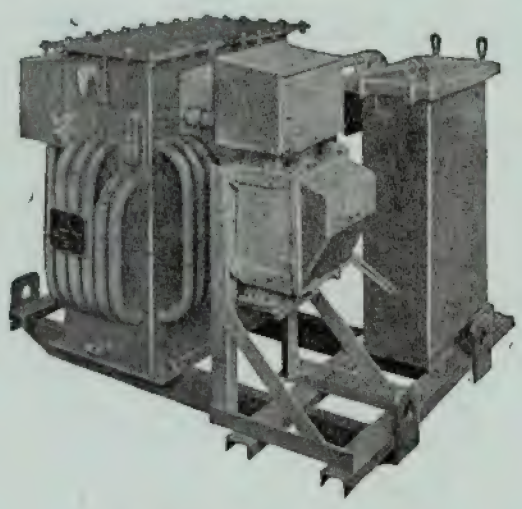
Concessionária do sistema de moldes deslizantes «PROMETO» e do sistema para execução de estacas de grande diâmetro «BENOTO»

Torre da Alfândega de Luanda
Execução com moldes deslizantes "PROMETO".
Altura total do deslize: 30 metros.
Duração do deslize: 5 dias e 20 horas.

POSTOS DE SOLDADURA A ARCO

'ENGLISH ELECTRIC'

Dentro do vastíssimo programa de produção da «**English Electric**», merecem especial relevo os seus postos de soldadura eléctrica, de cujos tipos citamos:



— Postos uni-operador de transformadores em banho de óleo para 210, 250, 300, 400 e 600 A. com condensador para correcção do factor de potência e interruptor-fusível.

— Postos multi-operador de transformadores em banho de óleo com 3, 6, 9 e 12 saídas independentes, para 300, 400 e 600 A.

— Equipamento ionizador de alta frequência para soldadura de metais não ferrosos.

A figura mostra um dos transformadores multi-operador de 300 A., para 3 soldadores, equipado com um condensador de 65 KVA e um tripolar de 150 A, actualmente funcionando em Portugal.

●

Representantes exclusivos para Portugal e África Ocidental Portuguesa:

MONTEIRO GOMES, LIMITADA

R. Cascais, 47 (Alcântara)
Telef. 637083 (3 linhas
LISBOA

P. do Município, 309-3.º
Telef. 25021
PORTO

E

BEJA — VILA FRANCA DE XIRA — LUANDA

Para impermeabilizar terraços, paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA

FABRICA EM SACAVÉM

TELEF. { 73 01 56 (4 linhas)

TELEG. EPALDA—LISBOA

SONDAGENS RÓDIO, L.DA

LISBOA

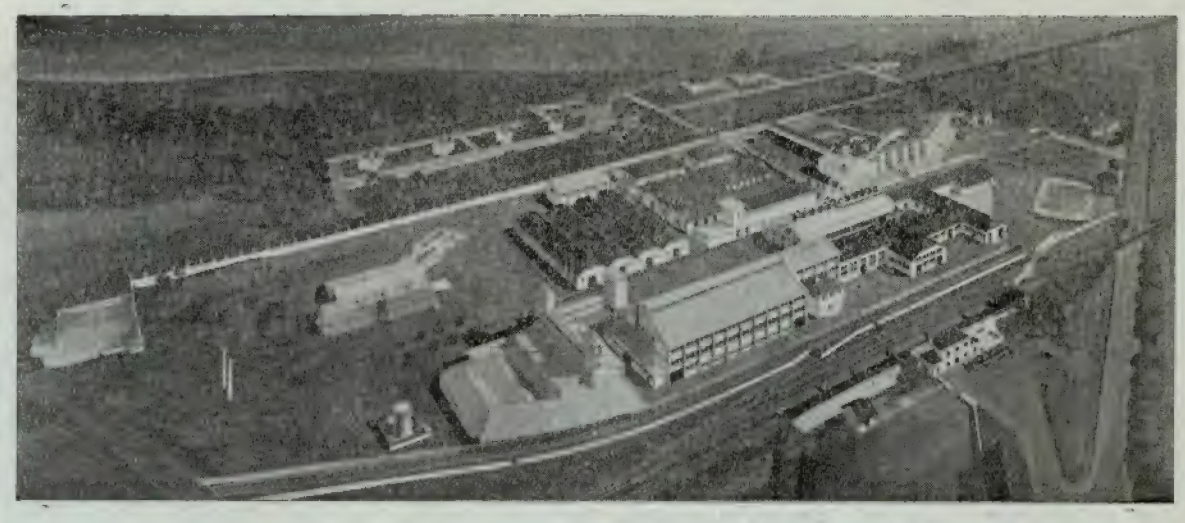
RUA S. MAMEDE AO CALDAS, 22, 3.º

Telefones: 2 8685 - 2 6865 ✦ Telegramas: SETANSOL

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

—//—

Sócio gerente: **Walter Weyermann**–Eng. civil



COMPANHIA PORTUGUESA DE FORNOS ELÉCTRICOS

PRODUTORA DE

FERRO GUSA

FERRO LIGAS

FERRO-MANGANÊS

SÍLICO-MANGANÊS

FERRO-SILÍCIOS

15 % - 25 % - 45 % - 75 % - 90 %

CARBONETO DE CÁLCIO

CIANAMIDA CÁLCICA

PASTA PARA ELÉCTRODOS

E EM MONTAGEM

GRAFITE

FÁBRICAS
CANAS DE SENHORIM
Telefone 67222

SEDE
Largo de S. Carlos, 4 - 2.º — LISBOA
Telefones 25343-29608-368989

LEACOCK (LISBOA), L.DA

AV. 24 DE JULHO, 16 — LISBOA

R. JOSÉ FALCÃO, 185 — PORTO

SECÇÃO DE MÁQUINAS E ELECTRICIDADE

REPRESENTANTES DE:

THE RAWLPLUG COMPANY, LTD.

Material de fixação para construção civil e mecânica.

HOOVER, LTD.

Motores eléctricos desde 1/8 até 3/4 H. P., Monofásicos e Trifásicos.

J. A. CRABTREE & CO. LTD.

Material para instalações de luz: interruptores, fichas, tomadas, etc.

Material para instalações de força: arrancadores, disjuntores, caixas, etc.

THE AUTOMATIC COIL WINDER AND ELECTRICAL EQUIPMENT CO, LTD.

Osciladores, capacímetros, texts universais, texts electrónicos, analisadores de válvulas, luxímetros, expositores para fotografias.

Máquinas para bobinar e enfitar.

GEORGE KENT

Contadores de água, de vapor e de óleo.

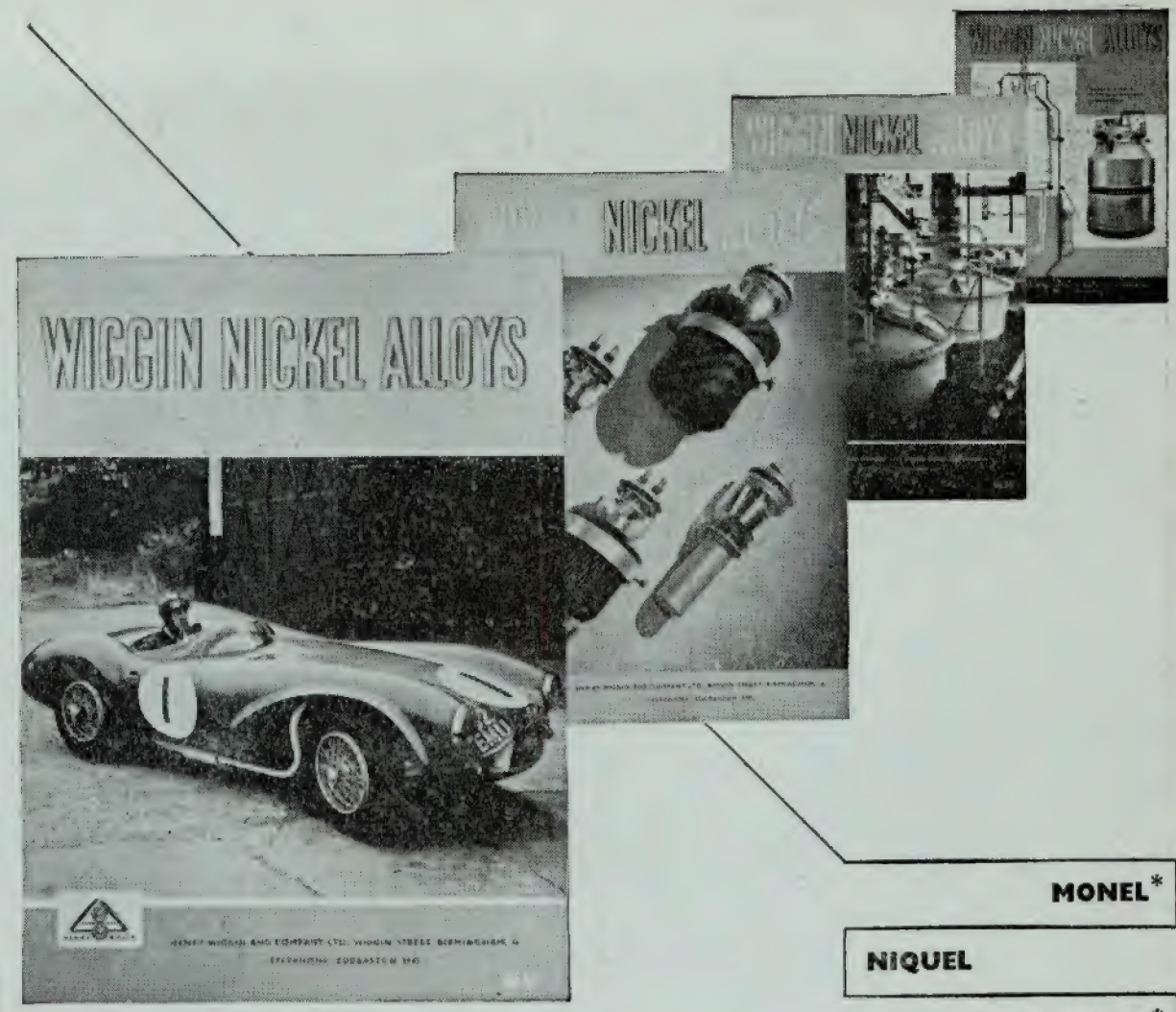
Tubos Venturi

Determinadores e controladores do pH, do CO_2 e pirómetros pelo processo potenciométrico.

Combustiómetros, manómetros, registadores de distâncias, medidores-registadores de caudais, medidores de orifícios em condutas para gases.

THORN ELECTRICAL INDUSTRIES, LTD.

Luz fluorescente.



A resposta aos vossos problemas...

Sempre que haja necessidade de materiais capazes de resistir a variações extremas de temperatura, à corrosão, à oxidação ou a esforços mecânicos, uma das ligas "Wiggin" de alto teor de niquel poderá, provavelmente, resolver as suas dificuldades. No nosso Boletim *Wiggin Nickel Alloys* são publicados artigos ilustrados descrevendo a forma como tais problemas estão a ser resolvidos em todos os ramos da indústria... e talvez o seu seja um deles. O Boletim *Wiggin Nickel Alloys* é fornecido gratuitamente a todos os interessados, e, a seu pedido, teremos muito prazer em lhe enviar um exemplar.

MONEL*

NIQUEL

INCONEL*

SÉRIE NILO

SÉRIE BRIGHTRAY*

FERRY*

CORRONEL* B

LIGAS MANGONIC

METAIS TERMO-ELECTRICOS

OUTRAS LIGAS DE NIQUEL

**Marca Registada*

HENRY WIGGIN AND COMPANY LIMITED

BIRMINGHAM - INGLATERRA

Representantes em Portugal: **AHLERS, LINDLEY, LIMITADA**
Rua do Ferregial de Baixo, 33-2º- LISBOA, C. Telef. 21321/4
Palacio do Atlântico, 408 Praça D. João I, PORTO. Telef. 31414/5

HENRY WIGGIN

w/ro/1

TÉCNICA

DIRECTOR: CARLOS MANUEL DE MEDEIROS PORTELA
ADMINISTRADOR: RICARDO MANUEL SIMÕES BAYÃO HORTA
SECRETÁRIO: ALEXANDRE CERVEIRA

Ano XXXIII - N.º 280 Março de 1958

C. D. U .539.17.004

ENERGIA NUCLEAR E SUA UTILIZAÇÃO

PELO DR. CARLOS CACHO
Físico, Junta de Energia Nuclear

Conferência proferida no Instituto Superior Técnico e integrada num ciclo sobre aplicações de Física Nuclear, promovida pela «Técnica», de colaboração com a Junta de Energia Nuclear e que teve lugar de 13 a 16 de Janeiro

Seja-me permitido começar por recordar alguns dos factos mais significativos acerca de átomos e da sua estrutura e acerca de núcleos atómicos e das partículas que os constituem:

1. — Átomos, Núcleos e Estrutura complexa dos núcleos

Do ponto de vista experimental não parecem subsistir quaisquer dúvidas acerca da legitimidade das nossas ideias actuais sobre a estrutura da matéria. Moléculas e átomos representam em muitos fenómenos, como se sabe, o papel de constituintes últimos.

São diferentes os átomos de elementos químicos diferentes. Os átomos de um determinado elemento químico, porém, são, se não em todas pelo menos nalgumas das suas características, idênticos.

De como é pequena a massa de cada átomo e da ordem de grandeza da relação entre as massas de átomos diferentes se pode concluir se se atender ao facto de que $6{,}025 \times 10^{23}$ átomos de hidrogénio têm uma massa total de 1,0080 grama, ao passo que o mesmo número de átomos de urânio tem uma massa total de 238,07 grama.

Crê-se que seja bastante complexa a estrutura de um átomo.

Desde as famosas experiências de Rutherford, em 1911, nós aceitamos que a essência da estrutura atómica seja um núcleo central — de dimensões muito pequenas em relação às dimensões do átomo — núcleo que possui uma carga eléctrica positiva, Ze, que é um múltiplo inteiro da carga eléctrica elementar e (1).

À volta do núcleo gravitam — ou mais correctamente, distribuem-se segundo leis que a mecânica quântica nos ensina — uns tantos electrões. São iguais o número de cargas positivas no núcleo e o número de electrões exteriores — o átomo é, portanto, elèctricamente neutro.

O número Z, das cargas positivas no núcleo ou dos electrões exteriores, é o chamado número atómico e é acessível a determinação experimental. Sabe-se que, muito antes de se conhecerem os detalhes da estrutura atómica que hoje julgamos conhecer, já Mendeléiev tinha encontrado o número Z e o tinha associado empìricamente com as características de cada elemento químico. A um determinado elemento químico — segundo Mendeléiev ou de acordo as nossas ideias actuais acerca da estrutura atómica — corresponde um determinado valor de Z.

(1) A carga elementar positiva, e, é igual em valor absoluto à carga do electrão e vale $4{,}803 \times 10^{-10}$ u. es.

Exemplificando: o átomo de hidrogénio (número atómico: 1) tem um núcleo, com uma carga positiva, e um electrão exterior; o urânio (número atómico: 92) — o mais pesado dos elementos que se encontram na natureza — é formado por átomos com 92 electrões dispostos à volta dum pequeno núcleo central no qual existem 92 cargas positivas elementares.

É no núcleo, cujas dimensões são da ordem de 10^{-13} cm para os elementos mais pesados e da ordem de 10^{-12} cm para os elementos leves, que se encontra concentrada pràticamente toda a massa do átomo — a massa da totalidade dos electrões exteriores é, na realidade, uma fracção muito pequena da massa do conjunto núcleo-electrões. No que respeita à massa, portanto, o átomo é, pràticamente, só o núcleo. A massa específica de um núcleo é excepcionalmente elevada: da ordem de 100 milhões de toneladas por cm^3! E é sensìvelmente independente da natureza química do elemento.

O núcleo aparece, ele próprio, como tendo uma estrutura complexa. Bàsicamente é um agregado de partículas de dois tipos diferentes: protões e neutrões.

Protões e neutrões — partículas com as quais se lida permanentemente nos laboratórios de física nuclear — têm massas sensìvelmente iguais (1), mas diferem essencialmente no seguinte: enquanto o protão tem uma carga eléctrica positiva elementar igual em valor absoluto à carga eléctrica de um electrão — recordemos que o núcleo do átomo de hidrogénio leve é apenas um protão — o neutrão é desprovido de carga eléctrica.

Se protões e neutrões retêm, ou não, no agregado nuclear as propriedades que se lhes encontra quando isolados é um problema que aguarda solução mesmo na física nuclear dos nossos dias. É-se levado a aceitar, realmente, a possibilidade de transformação de uma espécie na outra por um mecanismo provàvemente simples mas muito imperfeitamente conhecido.

Como quer que seja, no entanto, os números de protões e de neutrões num núcleo estável permanecem estatìsticamente constantes.

Àparte o que se verifica em relação ao número Z, das cargas positivas que se encontram no núcleo, o núcleo é ainda caracterizado por um outro número — o número de massa A — que é o inteiro mais próximo do número que exprime em unidades de massa atómica (2) a massa do núcleo.

Aceita-se que o número total de partículas no núcleo seja A. Se Z é o número de protões $N = A - Z$ é, portanto, o número de neutrões.

Núcleos há que são diferentes apenas porque têm números de neutrões diferentes. Tais núcleos — com o mesmo Z mas A diferente — pertencem a átomos que do ponto de vista químico são pràticamente idênticos; quer dizer, pertencem a átomos diferentes do mesmo elemento químico.

É costume dar a tais núcleos, ou aos átomos respectivos, uns em relação aos outros, o nome de isótopos.

A maioria dos elementos químicos existentes na natureza é uma mistura de isótopos. Se estes são estáveis a composição da mistura é constante (3).

---

(1) Massa do protão: 1,00758 u. m. a.

Massa do neutrão: 1,00813 u. m. a.

(2) Toma-se como unidade de massa atómica (u. m. a.) uma massa igual a $^1/_{16}$ da massa do átomo mais abundante de oxigénio (O^{16}). Expressa em grama a unidade da massa atómica vale $1{,}6596 \times 10^{-24}$ g.

(3) Fez-se referência à constância das proporções da mistura isotópica que um elemento estável normalmente é. Convém, no entanto, recordar que é hoje possível alterar essas proporções e até efectuar a separação completa dos isótopos de um mesmo elemento.

Assim, é possível obter-se «urânio enriquecido em urânio - 235» com, digamos, 20 % de urânio - 235 ou até urânio - 235 pràticamente puro.

Relativamente ao hidrogénio pode obter-se, por exemplo, deutério puro ou, o que é afinal o mesmo, água pesada pura ($O(H^1)^2$ ou $O D^2$).

O hidrogénio, por exemplo, é a seguinte mistura:

hidrogénio leve	H^1 $(Z=1, A=1)$	— 99,985 %
hidrogénio pesado ou deutério	H^2 $(Z=1, A=2)$	— 0,015 %

Interprete-se a composição indicada da seguinte maneira: numa massa de hidrogénio vulgar, qualquer que ela seja, 99,985 % dessa massa é formada por átomos em cujos núcleos existe apenas um protão (átomos de hidrogénio leve), ao passo que a massa restante, 0,015 %, é formada por átomos em cujos núcleos existe um protão e um neutrão (átomos de hidrogénio pesado).

Da mesma forma, o urânio é uma mistura de 3 isótopos cuja composição aproximada é a seguinte:

U^{234}	$(Z=92, A=234)$	— 0,006 %
U^{235}	$(Z=92, A=235)$	— 0,712 %
U^{238}	$(Z=92, A=238)$	— 99,282 %

Em conjunto, cerca de 280 espécies nucleares estáveis e de 50 instáveis (radioactivas) existem na natureza. Mais de 700, instáveis, tem sido possível obter por reacções nucleares de vários tipos. Quere dizer: conhecem-se mais de 1000 espécies nucleares diferentes; a cada uma corresponde um determinado valor de Z e um determinado valor de A; para Z as possibilidades são hoje pràticamente todos os números desde 1 a 102.

A instabilidade de um núcleo atómico — da qual resulta o fenómeno da radioactividade — evidencia-se na emissão de uma partícula α ou de uma partícula β, ou, muito excepcionalmente, de uma e outra não simultâneamente. Partículas α são, como se sabe, núcleos de hélio (2 protões e 2 neutrões); partículas β, electrões.

Pode ainda a instabilidade evidenciar-se na emissão de radiação γ — radiação electromagnética de menor comprimento de onda que os raios X. Ao contrário do que sucede com a emissão α ou a emissão β, das quais resultam alteração de uma estrutura nuclear — um núcleo que emite uma partícula α ou uma partícula β transforma-se num núcleo diferente — a emissão γ significa apenas uma transição de um estado excitado a outro de menor excitação, sem alteração da estrutura nuclear na qual se verifica.

2. — Energia libertada em processos nucleares. Casos da cisão e da fusão de núcleos atómicos

À primeira vista, se pensarmos que entre cargas eléctricas do mesmo sinal se exerce uma repulsão, pode parecer estranho que um núcleo — constituído, como supomos, por um certo número (Z) de cargas positivas e por um certo número ($N = A - Z$) de partículas neutras — mostre qualquer estabilidade. Instabilidade total deveria ser, aparentemente, a regra.

A objecção é, òbviamente, fictícia: a estabilidade terá de resultar, naturalmente, da acção de outras forças entre os constituintes do núcleo, forças que, necessàriamente, deverão ter, pelo menos parcialmente, um carácter atractivo.

Não se conhece exactamente a natureza dessas forças — as chamadas forças nucleares — nem a lei segundo a qual actuam, embora se possua um grande volume de informações a seu respeito. Aliás, o problema das forças nucleares não parece fundamentalmente distinto daquele outro a que atrás se fez referência: conservam protões e neutrões permanentemente a sua individualidade, quando constituintes do núcleo?

Desconhecidas as forças nucleares, nem por isso deixa de ser possível observar o resultado global da sua acção. Evidencia-se ele na chamada energia de ligação ou de coesão de um núcleo atómico.

De que maneira?

Recorramos à teoria da relatividade para o explicar. De entre os muitos resultados importantes dessa teoria destaca-se aquele que nos leva a considerar a massa de um sistema como uma das formas possíveis da sua energia.

A equivalência com outras formas de energia exprime-se pela famosa relação de Einstein

$$E = m\,c^2 .$$

De acordo com esta relação, se a massa de um sistema varia de m a isso corresponderá o aparecimento da energia $E = m\,c^2$ (c: velocidade de propagação da luz no vácuo) sob qualquer outra forma.

Se nos reportarmos ao núcleo e compararmos a soma das massas das partículas que o constituem

$$Z \,.\, m_P + N \,.\, m_N$$

m_P: massão do protão
m_N: massa do neutrão

com a massa do núcleo, M (Z, N), verificaremos que esta é menor.

À «perda» de massa

$$M\,(Z, N) - (Z\,m_P + N\,m_N)$$

corresponde, de acordo com a lei de equivalência, o aparecimento de energia sob outra forma — neste caso uma certa forma de energia potencial que é a energia de ligação do núcleo em questão e que é, afinal, o resultado da acção das forças nucleares.

Porque as massas dos núcleos e as das partículas que os constituem o são, a energia de ligação de um núcleo atómico é acessível a determinação experimental.

Posto isto, ocorre naturalmente a pergunta: O que é «energia nuclear»?

De acordo com os nossos conhecimentos actuais é a energia posta em jogo em qualquer processo que envolva núcleos e partículas fundamentais de que resulte um novo arranjo das partículas constituintes. Por outras palavras: é a energia posta em jogo num processo em que se verifiquem variações de estrutura nuclear.

Haverá «libertação» de energia se no processo se verificar «perda» de massa, quer dizer, se a massa total dos núcleos, ou núcleos e partículas, resultantes do processo for inferior à massa total dos núcleos, ou núcleos e partículas, com os quais ele se iniciou.

Considerem-se, com o objectivo de os submeter a uma breve análise, os dois processos que até agora levaram à produção de energia nuclear em larga escala. Referimo-nos à cisão de núcleos pesados, como os do urânio, e à fusão de elementos leves, como os do hidrogénio.

A cisão de um núcleo atómico, se bem que possa ser originada por uma partícula carregada — uma vez convenientemente acelerada — ou por radiação γ, ou que possa até verificar-se expontâneamente, é, como se sabe, particularmente interessante se provocada por neutrões. Como veremos, aliás.

Se um neutrão é captado, por exemplo, por um núcleo de urânio-235, formar-se-á um núcleo mais complexo — o chamado núcleo composto — no qual o excesso de energia em relação à estabilidade é relativamente grande. Normalmente a cisão desse núcleo composto ocorre: o núcleo fragmenta-se em duas partes e alguns neutrões são emitidos.

Do ponto de vista da utilização da energia nuclear a importância da cisão resulta essencialmente dos seguintes factos:

1.º: O processo é acompanhado da libertação de grandes quantidades de energia.
2.º: No processo verifica-se uma emissão de neutrões; podendo ele ser provocado por neutrões — como dissémos — segue-se que uma reacção em cadeia é, em princípio, possível.

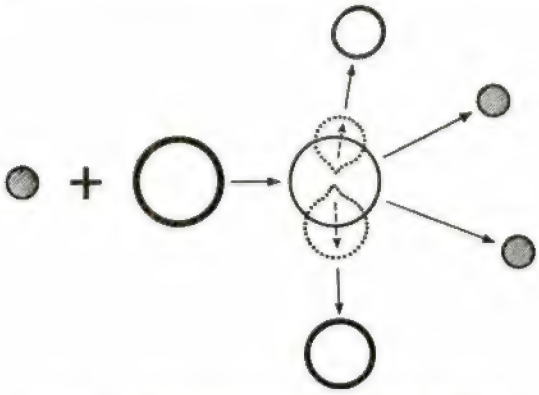


Fig. 1 — Esquema de uma reacção de cisão

Ilustremos o primeiro ponto com o cálculo da energia libertada num caso típico de cisão do urânio-235. Sabe-se que a cisão deste núcleo — ou, melhor, a cisão do núcleo resultante da captura de um neutrão por este núcleo — pode dar-se segundo um de trinta modos diferentes, dos quais um dos mais prováveis é o seguinte:

$$n + U^{235} \rightarrow \underset{(U^{236})}{\text{núcleo composto}} \rightarrow Y^{95} + I^{139} + 2\,n$$

Massa dos núcleos e partículas com os quais o processo se verificou	$M(n) + M(U^{235})$	$= 236{,}233$ u. m. a.
Massa dos núcleos e partículas que resultaram do processo	$M(Y^{95}) + M(I^{139}) + 2\,M(n)$	$= 235{,}918$ u. m. a.
Perda de massa = massa convertida noutra forma de energia		0,215 u. m. a.
Noutras unidades de energia por aplicação da relação de equivalência . . .		~ 200 MeV (1)

Para um físico nuclear, mais familiarizado com estas unidades, a libertação de 200 MeV num processo que envolve um só núcleo atómico significa a libertação de uma grande quantidade de energia (2).

Em unidades mais correntes isso, de resto, torna-se evidente. De facto, tomando o número anterior como base, a cisão de todos os núcleos que existem num grama de urânio-235 implica a produção de 24.000 kilowatt-hora! Ou doutro modo: o consumo por cisão de um grama de urânio-235 por dia corresponde a uma potência aproximada de 1.000 kW!

---

(1) 1 MeV $= 1{,}601 \times 10^{-6}$ erg $= 4{,}45 \times 10^{-20}$ kilowatt-hora.

(2) Note-se que não obstante ser muito grande a energia que se liberta naquele processo, que envolve apenas um núcleo atómico, essa energia não representa senão aproximadamente 1‰ da energia que, teòricamente, se poderia obter do mesmo núcleo. De facto, se toda a massa de um núcleo do urânio-235 fosse transformada noutra forma de energia obter-se-iam aproximadamente 200.000 MeV e por grama de urânio-235 ter-se-iam 24 milhões de kilowatt-hora!

Deixemos momentâneamente a cisão e tomemos o caso da fusão nuclear.

O mecanismo de uma reacção de fusão é inteiramente diferente do mecanismo de uma reacção de cisão.

Fig. 2 — Representação esquemática da reacção de fusão $H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$

Numa reacção de fusão dois núcleos fundem-se para formar um núcleo mais pesado. A libertação de energia é considerável quando os núcleos iniciais são muito leves, como sucede, por exemplo, se se trata de núcleos de hidrogénio.

Tanto quanto sabemos, não se conhece ainda qualquer processo de produzir uma reacção de fusão que afecte uma grande massa de material a não ser por meio de temperaturas elevadíssimas, da ordem de muitos milhões de graus — por via termonuclear, como se diz.

Como exemplo, considere-se a reacção que pode produzir-se entre dois isótopos do hidrogénio: o deutério (A = 2) que existe na natureza e o trítio (A = 3) que pode obter-se artificialmente.

Note-se que a escolha desta reacção não tem o objectivo de a destacar por qualquer forma. É apenas uma reacção possível. Ela é, no entanto, uma das reacções aparentemente mais fáceis de produzir por via termonuclear.

$$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$$

Massa dos núcleos e partículas com os quais o processo se verificou	$M(H^2) + M(H^3) = 5{,}0317$ u.m.a.
Massa dos núcleos e partículas que resultaram do processo	$M(He^4) + M(n) = 5{,}0128$ u.m.a.
Perda de massa = massa convertida noutra forma de energia	0,0189 u.m.a.
Noutras unidades de energia	~ 17,6 MeV

Segue-se que a fusão de 1 grama da mistura (0,4 grama de deutério + 0,6 grama de trítio) origina uma libertação de energia da ordem de 95.000 kilowatt-hora!

3. — Produção de energia em larga escala por processos nucleares

Tanto a cisão como a fusão nucleares podem ser usadas para a produção de energia em larga escala sob uma forma explosiva. É o caso das bombas atómicas, baseadas em processos de cisão, e o das bombas termonucleares, baseadas em processos de fusão.

Quando se trata, porém, da libertação útil de energia — gradual e controlável — só para sistemas baseados na cisão se encontrou, até agora, solução prática.

Concentremo-nos, por isso, na cisão nuclear e procuremos examinar os fundamentos dessa solução:

a) Materiais cindíveis e férteis

É o urânio, como se sabe, o material de que normalmente se lança mão para a produção de energia em resultado de cisão nuclear. O tório é outra possibilidade.

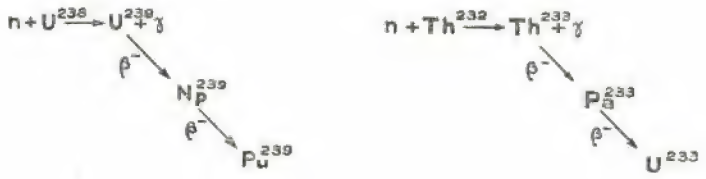
Sendo a cisão um processo nuclear note-se desde já que, a esse respeito, carece de sentido falar-se do urânio como elemento químico; para uma boa compreensão dos fenómenos que se passam há, necessàriamente, que raciocinar em termos das espécies nucleares que o constituem.

Dos isótopos de urânio existentes na natureza — a que já fizémos referência — um está em posição especial no que se refere à cisão: o urânio-235.

Pode ele sofrer cisão em resultado da captura de neutrões de qualquer velocidade ou, o que é o mesmo, de qualquer energia. «Grosso modo» pode dizer-se até que a cisão é tanto mais provável quanto menor for a energia do neutrão capturado, facto que é de grande importância nas aplicações da energia nuclear.

Outro tanto não sucede ao urânio-238, de longe o isótopo mais abundante no urânio natural. O urânio-238 só sofre cisão em resultado da captura de neutrões que tenham pelo menos uma energia de 1 MeV. Encontra-se em condições análogas o tório-232 — um dos isótopos do tório.

Ocorre mencionar que duas outras espécies nucleares — o plutónio-239 e o urânio-233 — que podem ser obtidas artificialmente em resultado da captura de neutrões pelo urânio-238 e pelo tório-232 por processos que podem esquematizar-se como segue



têm comportamento análogo ao do urânio-235.

Convém resumir as afirmações anteriores:

Com neutrões de pequena energia o urânio-235 (existente na natureza), o plutónio-239 e o urânio-233 (obtidos artificialmente) podem sofrer cisão; chama-se-lhes materiais cindíveis. Nas mesmas condições, o urânio-238 e o tório-232 não sofrem cisão mas podem transformar-se em materiais cindíveis; chama-se-lhes, por isso, materiais férteis ou conversíveis.

b) **Reacção em cadeia. Caso de uma esfera de material cindível. Noção de massa crítica**

Poderá parecer à primeira vista que é sempre possível estabelecer e manter uma reacção em cadeia numa massa qualquer de urânio. A situação não é, felizmente, tão simples como isso. Como vamos ver.

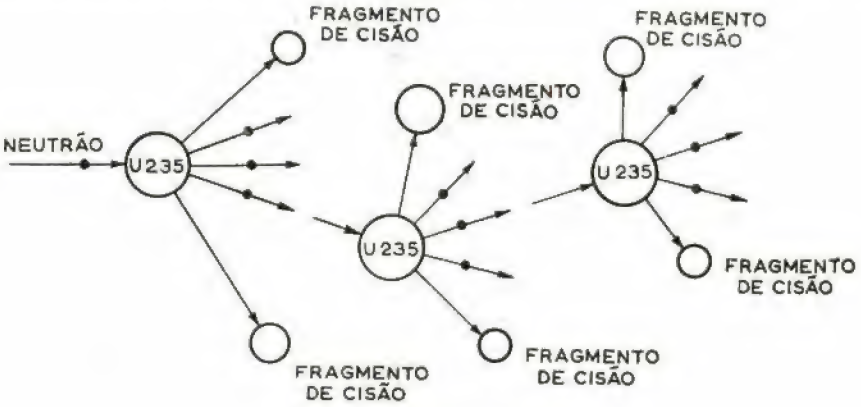


Fig. 3 — Reacção em cadeia

Mudemos completamente de campo de visão. Em vez de continuarmos a considerar um mundo que, com imprecisão desculpável, se poderia dizer de quase infinitamente pequenos, com átomos cujas dimensões são da ordem de 10^{-8} cm e núcleos cujas dimensões são da ordem de $10^{-13} - 10^{-12}$ cm,

passemos para a escala em que hoje se lida nas aplicações práticas: kilogramas de material cindível, muitas toneladas de urânio natural.

Seja, por exemplo, uma massa de material cindível absolutamente puro — urânio-235 para concretisar. Não esqueçamos: o número de átomos (e portanto de núcleos) é agora fantástico. 235 gramas de urânio-235, por exemplo, contêm aproximadamente 6×10^{23} átomos.

Admitamos que um neutrão entra no sistema e vai provocar a cisão de um determinado núcleo de urânio-235 (1). Dois ou três neutrões (2,5 em média para o urânio-235; 3,0 em média para o plutónio-239) serão emitidos.

Cada um dos neutrões formados

a) ou sai do sistema,
b) ou é capturado por outro núcleo de urânio-235, sem provocar cisão,
c) ou é capturado por outro núcleo de urânio-235, provocando cisão da qual resultam outros neutrões.

Em resultado de qualquer dos dois primeiros processos os neutrões, digamos, perdem-se; deixam de ser úteis para a propagação de qualquer reacção em cadeia. No último processo há, pelo contrário, produção de neutrões.

Evidentemente, uma reacção em cadeia poderá manter-se se o sistema for tal que a produção de neutrões (em resultado de cisão) se faz com uma cadência tal que ultrapassa ou pelo menos iguala a cadência segundo a qual as «perdas» se verificam.

É fácil de provar para uma espera de raio R que a probabilidade de que um neutrão se torne eficiente na propagação de uma reacção em cadeia aumenta com o raio (2).

Concebe-se assim que exista um valor de R para o qual os neutrões se «perdem» com a mesma cadência com que são produzidos. Diz-se então que o sistema tem dimensões críticas ou que possui a massa crítica. Num tal sistema uma reacção em cadeia manter-se-á em regime constante: o número de neutrões no sistema permanece o mesmo.

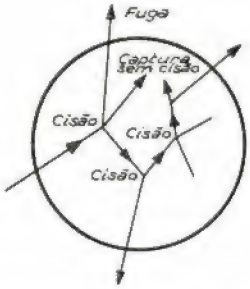


Fig. 4 — Processos ocorridos com neutrões numa massa de material cindível puro

Se o sistema tem massa superior à massa crítica uma reacção em cadeia nele iniciada propagar-se-á de forma divergente. O número de cisões e o número de neutrões aumentam constantemente e a temperatura do sistema eleva-se sucessivamente visto que a energia libertada em cada cisão se manifesta em grande parte sob a forma de energia cinética dos fragmentos da cisão, energia cinética que imediatamente se transforma em energia calorífica durante o processo pelo qual esses fragmentos são trazidos ao repouso em resultado de interacções electromagnéticas com átomos vizinhos.

---

(1) Ou que se dá a cisão expontânea de um núcleo de urânio - 235.

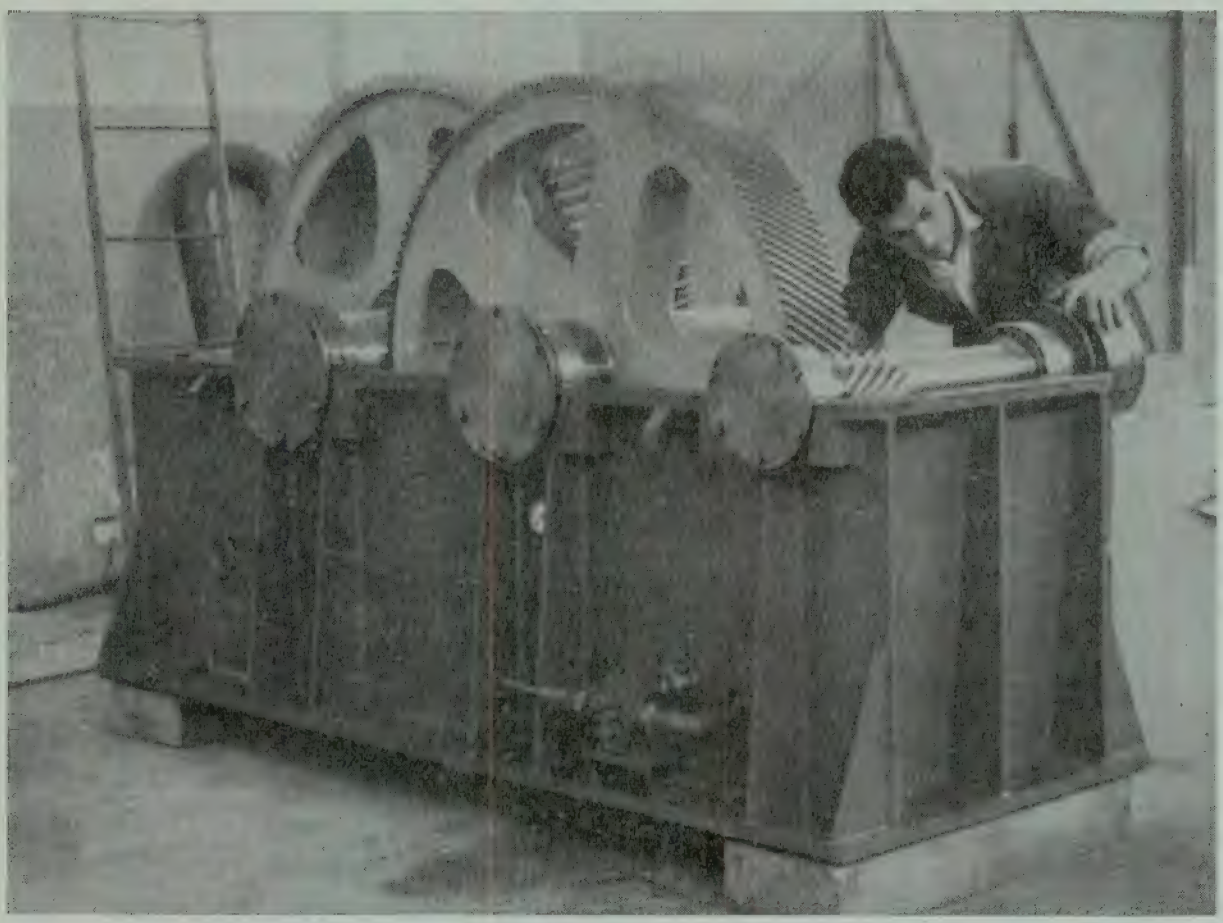
(2) Esquemàticamente pode dizer-se:

A fuga de neutrões é um processo de superfície, portanto porporcional a R^2, enquanto que a produção de neutrões por cisão é um fenómeno de volume, portanto porporcional a R^3.

MAGUE

S. E. MONIZ DA MAIA & VAZ GUEDES, L.DA

Alverca—Portugal



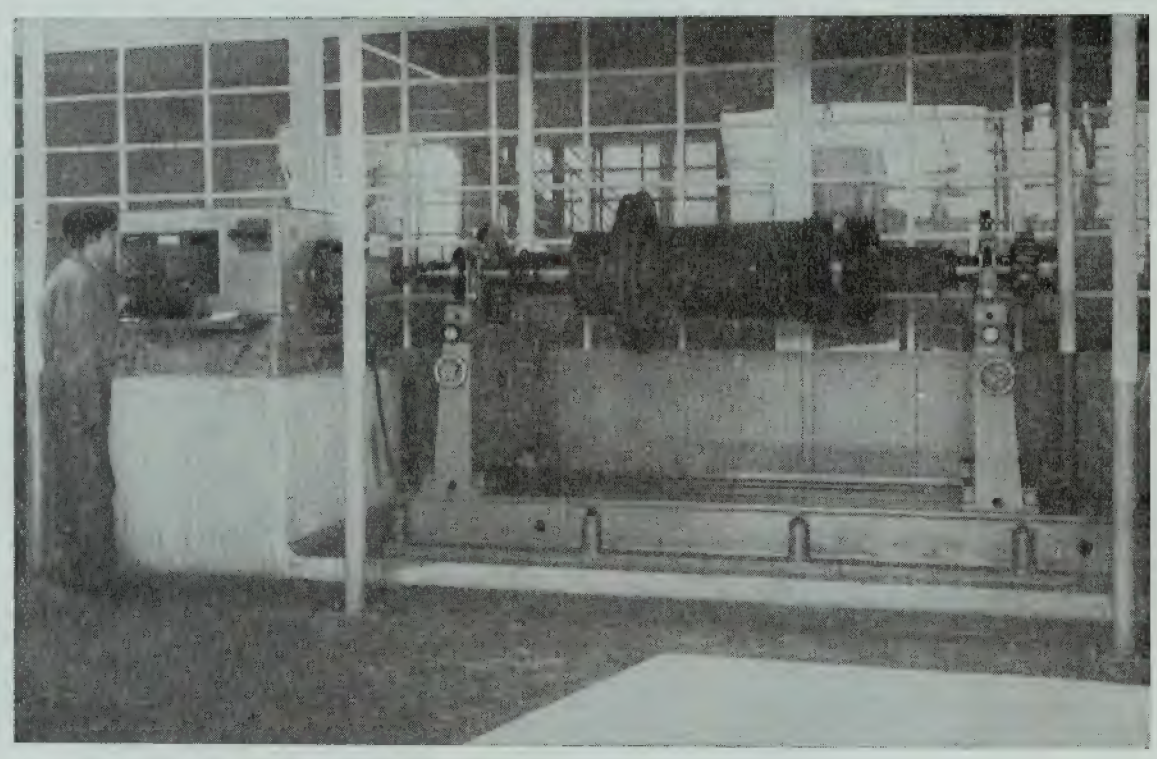
Redutor de 65 CV-725/13,8 r. p. m.
Destinado a um forno de cimento da Empresa de Cimentos de Leiria.

PROJECTO E FABRICO DE

PONTES ROLANTES
GUINDASTES
GRUAS. DERRICKS E GUINCHOS
APARELHOS DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS
CONSTRUÇÕES METÁLICAS PESADAS

A COMPANHIA UNIÃO FABRIL

põe à disposição dos seus clientes no Estaleiro Naval:



— Uma oficina de Ensaios e Reparação Diesel

— Uma máquina electrodinâmica de equilibragem para rotores de 30 a 3000 Kgs. — 2 M. de diâmetro máximo — 3,420 m. entre apoios.

ROCHA DO CONDE DE ÓBIDOS

LISBOA

Telef. 66 21 48

Não seja a reacção em cadeia controlada e o sistema destruir-se-á como consequência da quantidade de calor desenvolvida.

c) Sistemas mais complexos de material cindível. Conveniência do uso de um moderador

Os modernos reactores nucleares, nos quais se produzem grandes quantidades de energia, de uma forma gradual e controlada, são sistemas bastante mais complexos do que a simples massa de material cindível a que acabamos de fazer referência.

Uma das diferenças principais diz respeito ao combustível. Em vez do material cindível puro, que há pouco considerámos, usa-se ou urânio natural — no qual só 0,712% da massa é cindível em resultado de captura de neutrões lentos — ou urânio enriquecido, em maior ou menor grau, em material cindível.

Por outro lado, a grande maioria dos reactores, já construídos ou em construção, contém na sua estrutura aquilo a que se chama um moderador. Pelas razões que a seguir descreveremos.

Sabe-se que os neutrões resultantes da cisão nuclear — aqueles que hão-de ir provocar outras cisões e portanto manter a reacção em cadeia — são em grande parte emitidos com energias da ordem, de 1 a 2 MeV (1). Com essa energia eles podem, em verdade, provocar a cisão, quer do urânio-235 quer do urânio-238, mas o facto é que a probabilidade de que isso se verifique é muito mais pequena do que a probabilidade de que se verifique a cisão do urânio-235 com neutrões de muito menor energia — com os chamados neutrões térmicos.

Torna-se, portanto, útil reduzir a energia dos neutrões produzidos na cisão até aos valores térmicos, da ordem de uma pequena fracção de 1 eV.

Consegue-se isso introduzindo um material adequado na constituição do reactor. Por choques sucessivos com os núcleos desse material, os neutrões vão gradualmente perdendo a sua energia cinética até que, eventualmente, se tornam térmicos.

Ao material a usar como moderador pede-se: que os seus núcleos sejam leves, para que a fracção de energia perdida por um neutrão, em cada colisão, seja grande; que a probabilidade de captura de um neutrão por um núcleo seja o mais pequena possível, por razões de «economia» de neutrões. Estas restrições reduzem grandemente o número de materiais que podem ser usados como moderadores — grafite, água pesada, água comum, berílio e pouco mais, são as possibilidades — e impõem condições muito severas quanto ao grau de pureza dos materiais que se pretenda utilizar.

Reactores nucleares em cuja constituição entra um moderador — nos quais a cisão é essencialmente provocada por neutrões térmicos — são chamados térmicos.

d) Descrição elementar de um reactor e dos fenómenos que nele se passam

É já muito grande o número de reactores construidos ou em construção.

Tendo em mente os reactores destinados à produção de energia — e não apenas os reactores de investigação e os reactores experimentais — e falando em termos gerais, pode dizer-se que a grande maioria tem as seguintes características:

1. Existe um núcleo activo no qual ocorre a maioria das cisões e onde se liberta, portanto, sob forma calorífica, a energia resultante da cisão.

2. No núcleo existem o combustível, que contém em maior ou menor abundância o material cindível, e, normalmente, um moderador.

---

(1) Podem calcular-se as velocidades a que estas energias correspondem tendo em atenção a expressão $W = \frac{1}{2} m v^2$, ou antes a sua equivalente relativística, da energia cinética de uma partícula, e notando que 1 MeV $= 1{,}601 \times 10^{-6}$ erg e que a massa de um neutrão é $1{,}673 \times 10^{-24}$ g.

Como combustível poderá usar-se

a) Urânio natural
b) Urânio enriquecido em urânio - 235 (ou, eventualmente, em plutónio - 239 ou em urânio - 233)
c) Altos concentrados de urânio - 235 (ou, eventualmente, de plutónio - 239 ou de urânio - 233).

3. O núcleo é normalmente rodeado por um reflector de material apropriado o qual, por processos análogos aos que se passam no moderador, reduz as perdas por fuga.

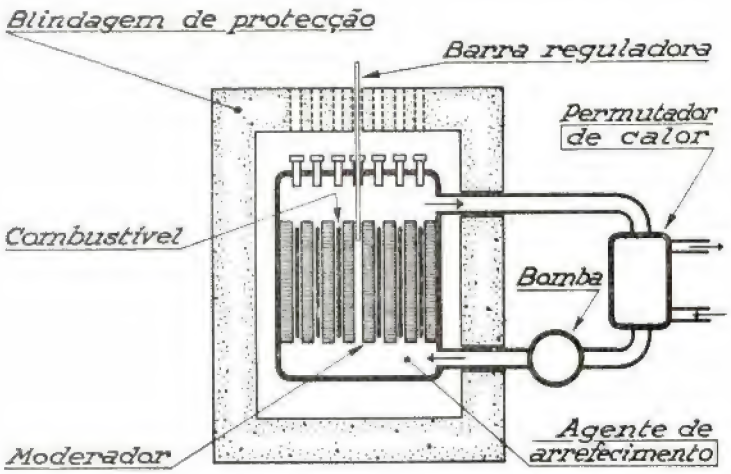


Fig. 5 — Esquema de um reactor nuclear para produção de energia

4. A regulação consegue-se ou pelo movimento, no interior do núcleo, de barras que contêm um material que é fortemente absorvente de neutrões (cádmio, boro, etc.) ou pelo movimento de partes do núcleo ou do reflector.

   Pelo movimento destas barras — tomando as barras absorventes de neutrões como exemplo — provoca-se a passagem do sistema de sub-crítico (manutenção impossível de uma reacção em cadeia) a super-crítico (a reacção em cadeia propaga-se de forma divergente) quando se pretende pôr o reactor em funcionamento, e a crítico uma vez atingido o nível de produção de energia desejado; e, inversamente, de crítico — ou super-crítico — a sub-crítico quando o que se visa é a interrupção do funcionamento do reactor.

5. Se o reactor se destina à produção de energia eléctrica, por exemplo, a quantidade de calor produzida no núcleo é transferida para o exterior por intermédio de um agente de arrefecimento (gás, água, metal líquido, etc.) que circula no interior do reactor. O agente de arrefecimento passa num sistema permutador de calor e cede, aí, a quantidade de calor absorvida à água de um circuito secundário do que resulta a formação de vapor que é subsequentemente usado à maneira clássica.

As dimensões e estrutura do sistema são de tal ordem que nele se pode verificar a realização de uma reacção em cadeia, em regime permanente, a diferentes níveis de energia abaixo de um nível máximo pré-estabelecido (1).

(1) Este nível máximo está òbviamente relacionado com a potência do reactor.

Para isso — e até ao nível máximo a que se pode operar — deve ser possível, dando às barras reguladoras a posição conveniente, dar ao sistema uma configuração tal que se possa estabelecer um equilíbrio entre o número de neutrões que se produz, em resultado de reacções de cisão, e o número de neutrões que se perde, em cada um dos seguintes processos:

a) Saída do sistema
b) Captura sem cisão por núcleos do combustível
c) Captura parasítica por núcleos do moderador, do agente de arrefecimento, das barras reguladoras, dos materiais de estrutura, dos produtos da cisão e das impurezas do moderador e do combustível.
d) Captura com cisão por núcleos do combustível.

Exprime-se normalmente que um sistema é sub-crítico, crítico ou super-crítico em termos do chamado «factor de multiplicação».

Em geral, a primeira análise de um sistema específico faz-se admitindo que o sistema tem dimensões infinitas; isto é, considera-se um sistema do qual não há fugas de neutrões.

Suponhamos, para um tal sistema, que num determinado instante existem n neutrões. Decorrido um pequeníssimo intervalo de tempo cada um destes neutrões terá «vivido» a sua curta vida no interior do sistema: uns terão sido capturados produzindo cisão e dando origem, portanto, a outros neutrões; outros, pelo contrário, terão sido pura e simplesmente capturados. O balanço será uma segunda geração de neutrões em número de n'.

Uma reacção em cadeia estará a propagar-se, de forma divergente se $n' > n$, em regime constante se $n' = n$ e de forma convergente, tendendo a terminar, se $n' < n$.

Define-se o factor de multiplicação por

$$k_\infty = \frac{n'}{n}.$$

Quando se passa ao caso do sistema de dimensões finitas há que entrar em linha de conta com as fugas de neutrões. O factor de multiplicação é então

$$k_{ef} = k_\infty - L$$

em que L nos dá conta do número de neutrões que saiem do sistema, por cada neutrão que é capturado pelo urânio - 235.

Um dado sistema diz-se crítico se $k_{ef} = 1$ e super-crítico se $k_{ef} > 1$; em qualquer destes casos uma reacção em cadeia é possível. Se $k_{ef} < 1$ o sistema é sub-crítico.

No caso de um reactor nuclear, consoante a posição das barras de regulação, no que se refere à absorção de neutrões, é, ou a posição de máxima eficiência ou a posição de mínina eficiência, o factor de multiplicação do sistema, k_{ef}, toma um valor mínimo, $k_{ef}^{mín.}$, menor do 1 ou um valor máximo, $k_{ef}^{máx.}$, maior do que 1. À diferença entre os dois valores anda associada a noção de reactividade do sistema.

Referindo-nos a um reactor térmico o esquema seguinte dá conta dos processos que se verificam e da maneira como o coeficiente k pode, em princípio, ser calculado.

Para cada neutrão absorvido pelo urânio-235 existe uma probabilidade elevada de que se verifique cisão; pode porém verificar-se captura sem cisão.

Seja η o número de neutrões produzidos por cada neutrão que é absorvido pelo urânio-235.

Existe uma pequena probabilidade de que esses neutrões, rápidos, emitidos em resultado da cisão de urânio-235, provoquem imediatamente a cisão de núcleos de urânio-238. Dá-se conta desse efeito introduzindo um coeficiente ϵ; o número de neutrões η será ligeiramente aumentado, em resultado da cisão «rápida» de núcleos de urânio-238, e passará a ser $\eta\epsilon$.

É este o número dos neutrões que vão sofrer moderação.

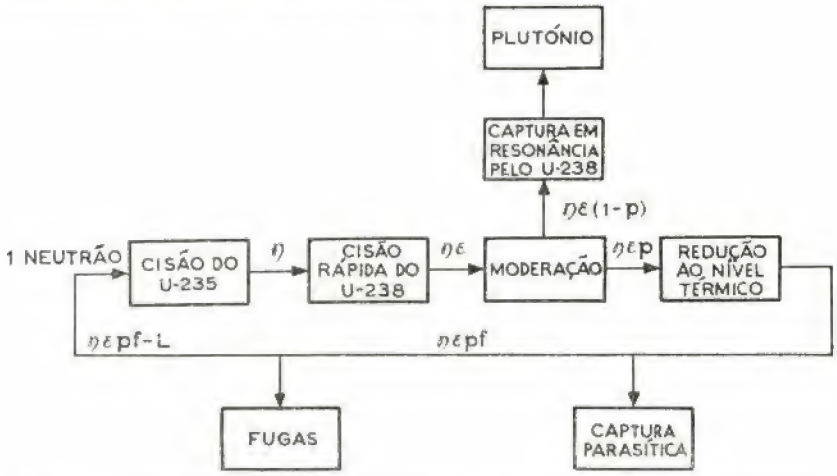


Fig. 6 — Sumário dos processos verificados com neutrões num reactor térmico

No decorrer desse processo a energia de cada neutrão passa por um valor tal que a sua captura (sem cisão) pelo urânio-238 se torna relativamente provável (captura em resonância).

Tendo em conta este efeito, sendo p a probabilidade de um neutrão não ser capturado pelo urânio-238, será $\eta\epsilon p$ o número de neutrões que atinge o estado térmico e $\eta\epsilon$ (1-p) o número de neutrões capturados.

Uma vez no estado térmico, uns tantos sofrerão captura parasítica; outros, a maioria, irão provocar cisão.

Introduzindo o factor de utilização térmica, f, para designar a probabilidade de que um neutrão térmico vá ser capturado pelo urânio-235, o número de neutrões que serão capturados, dos η inicialmente produzidos, é $\eta\epsilon pf$.

Atendendo à definição de k_∞ é

$$k_\infty = \eta\epsilon pf$$

Por via experimental ou teórica, procura-se determinar as constantes η, ϵ, p e f, referentes ao material cindível e à estrutura do sistema, e assim determinar k_∞.

Se se atender à fuga de neutrões será

$$k_{ef} = k_\infty - L$$

como já se viu.

e) **Regeneração de material cindível**

Fixemo-nos nos dois processos que podem ocorrer com núcleos do combustível em resultado da captura de neutrões:

Captura seguida de cisão no urânio-235	Captura sem cisão no urânio-238
↓	↓
Consumo de material cindível (Urânio-235)	Produção de material cindível (Plutónio-239)

No primeiro verifica-se consumo de material cindível. No segundo, pelo contrário, observa-se a produção de material cindível por conversão do urânio-238.

Significa isso que, num reactor, enquanto se vai consumindo material cindível, se vai também, pelo menos parcialmente, regenerando material cindível.

Este facto é de grande alcance em tudo o que se refere a reactores nucleares. De facto, se bem que o plutónio que por este processo se produz só tenha tido, até agora, pràticamente valor militar — como se sabe, há reactores destinados exclusivamente à produção de plutónio para fins militares — tudo indica que ele venha a ser usado, como combustível, nos futuros reactores. Convém por isso que a regeneração seja tão acentuada quanto possível.

De notável sobre este problema o facto de que teòricamente — e, de certo modo, já se fez a confirmação experimental — é possível obter-se no funcionamento de um reactor, mais material cindível do que aquele que se consome.

Examinemos ràpidamente este aspecto da questão:

Recordemos que por cada neutrão absorvido pelo urânio 235 se produzem em média η neutrões. Só um desses neutrões é necessário para a propagação da reacção em cadeia.

Se for P o número médio de neutrões que vêm a perder-se por fuga ou por captura parasítica de qualquer espécie segue-se que

$$\eta - 1 - P \quad \text{neutrões}$$

poderão ser capturados pelo material conversível. Daí resultarão

$$C = \eta - 1 - P \quad \text{núcleos}$$

do outro material cindível.

Resumindo: houve o consumo de um núcleo de material cindível; produziram-se $\eta - 1 - P$ núcleos doutro material cindível.

A diferença entre o número de núcleos produzidos e o número de núcleos consumidos é portanto

$$G = C - 1 = \eta - 2 - P$$

Para que haja realmente lucro ($G > o$) (1) — isto é, um reactor produzindo mais material cindível do que o que consome — é necessário que seja

$$\eta > 2 + P$$

o que significa que η deverá ter um valor superior a 2 e que as perdas P deverão ser muito cuidadosamente reduzidas de modo a que não excedam um valor máximo, que é função do valor de η — de facto η-2.

Para os diferentes materiais cindíveis a ordem de grandeza dos valores de η é a seguinte

	Urânio-233	Urânio-235	Plutónio-239
caso de neutrões térmicos	$\eta \sim 2{,}28$	$\eta \sim 2{,}08$	$\eta \sim 2{,}05$
caso de neutrões rápidos	$\eta \sim 2{,}50$	$\eta \sim 2{,}24$	$\eta \sim 2{,}74$

Do estudo destes dados segue-se que no caso de neutrões térmicos só o urânio-233 oferece possibilidades de utilização num sistema que realmente dê lucro em material cindível, visto que quer para o urânio-235 quer para o plutónio-239 η é só muito ligeiramente superior a 2; é pràti-

(1) Um sistema para o qual isso se verifique poder-se-á chamar «hiper-regenerador» (na designação inglesa «breeder»), reservando-se o nome de «regeneradores» para os sistemas para os quais $G \leqslant 0$.

camente impossível reduzir as perdas P a qualquer coisa inferior a 0,08 ou a 0,05. No caso de reactores rápidos, porém, existe em princípio a possibilidade de qualquer dos materiais cindíveis poder ser usado, com especial relevo para o plutónio.

Vários reactores experimentais têm sido construidos ou estão em construção nos quais se procura utilizar estes resultados.

4. — Breves considerações sobre o estado actual do problema da produção prática de energia nuclear.

Dito isto, pela forma elementar por que o foi, forçoso se torna que paremos aqui. Uma análise mais profunda dos processos que se verificam no funcionamento de um reactor teria de ser, necessàriamente, mais demorada.

Os factos fundamentais referentes a esta forma de produção de energia nuclear são, de certo modo, de fácil compreensão. A teoria, a despeito das muitas complicações matemáticas, é, bàsicamente, simples. É na passagem à prática que surgem realmente as dificuldades.

Hoje, não obstante essas dificuldades, existem já grandes centrais nucleares que estão sendo usadas na produção de energia eléctrica. De uma forma melhor ou pior, portanto, as dificuldades encontram-se resolvidas.

As soluções adoptadas são condicionadas por certos factos que são peculiares a esta forma de produção de energia dos quais poderemos talvez salientar os seguintes:

1. O urânio-235, que é o material cindível, existe em quantidade relativamente pequena no urânio natural. Para alguns tipos de reactores um certo enriquecimento do urânio torna-se necessário.
2. A escolha de qualquer material para a estrutura de um reactor está sujeita à condição severa de que o material não absorva grandemente neutrões.
3. A energia libertada na cisão aparece, em última análise, sob a forma calorífica em resultado da transformação da energia cinética dos fragmentos da cisão.
4. São fortemente radioactivos os fragmentos resultantes da cisão nuclear. Daí resulta uma enorme actividade radioactiva dos elementos combustíveis que tenham sido irradiados

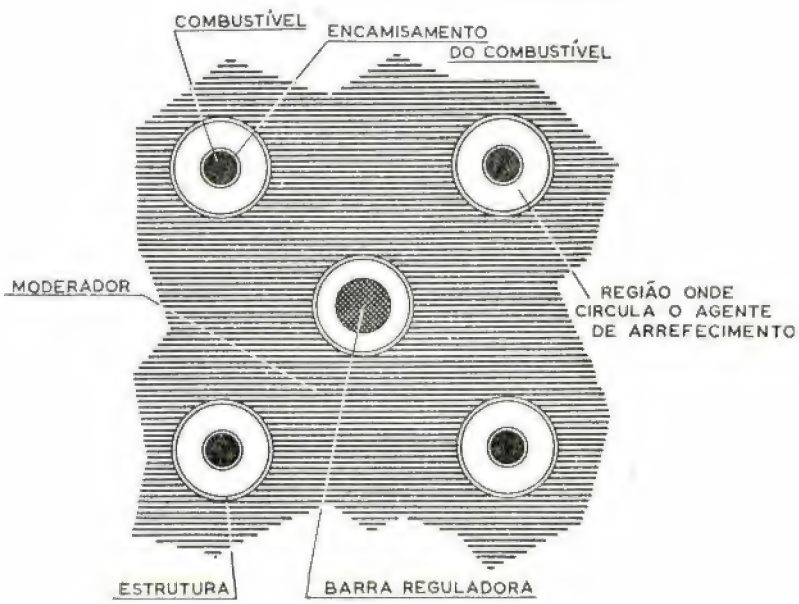


Fig. 7 — Corte esquemático de um pormenor do núcleo de um reactor nuclear

num reactor. Isso, por um lado, força a grandes blindagens para protecção contra as radiações; por outro, impõe condicionamentos muito apertados, quer no que se refere ao fabrico dos elementos combustíveis, quer no que diz respeito às condições em que deverá fazer-se o tratamento químico a que esses elementos combustíveis têm mais tarde de ser sujeitos.

Equacionadas e resolvidas em princípio todas estas dificuldades pode dizer-se que a actividade de todos quantos hoje andam ligados à construção de reactores visa, em grande parte, a introdução de aperfeiçoamentos de que resulte um melhor rendimento técnico e económico das instalações.

Não há, pode dizer-se, questões de princípio em jogo.

Nos anos que vão seguir-se centrais nucleares de vários tipos entrarão em serviço. Outras — dos tipos já experimentados — servirão de base para a construção de centrais maiores e mais aperfeiçoadas.

Tudo leva a crer que, dentro de alguns anos, a energia nuclear resultante da cisão nuclear esteja a ser usada em escala de certo modo significativa e produzindo energia eléctrica por preços que serão comparáveis aos preços da energia que hoje se obtém pelos processos conhecidos.

Existem muitas possibilidades diferentes de construir um reactor. Atente-se nas possibilidades que existem relativamente ao combustível, ao moderador e ao agente a usar para a extracção do calor produzido no reactor, que se resumem no quadro seguinte.

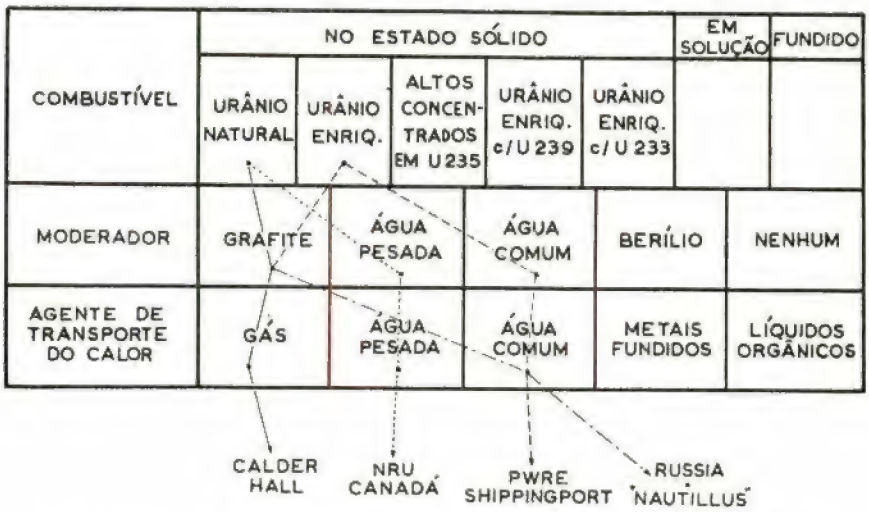


Fig. 8 — Alguns materiais utilizáveis na construção de reactores nucleares

Se bem que nem todas as combinações sejam nuclearmente possiveis, existe no entanto um número muito razoável de possibilidades. E, em cada caso, um grande número de variedades estruturais pode ser concebido.

A todos quantos andam interessados na utilização dos reactores nucleares para a produção de energia, põe-se hoje, constantemente, a pergunta: Qual o melhor reactor?

Responder a esta pergunta parece actualmente tarefa impossível. Há inúmeros aspectos a considerar — de todas as ordens: técnicos, económicos e até políticos — e não parece possível formular-se ainda uma opinião exacta sobre o conjunto de todos eles.

Dentro de alguns anos, conhecidas com mais detalhe as condições de funcionamento das centrais nucleares já em operação ou, presentemente, em construção, será possível, talvez, conhecer

com alguma precisão a resposta àquela pergunta. Mas não surpreenderá, creio, que se conclua que não há uma resposta única. É bem possível que vários reactores venham a estar, do ponto de vista técnico e do ponto de vista económico, aproximadamente nas mesmas condições. E que sejam afinal condições próprias dos países que projectam a instalação dos reactores que venham permitir afirmar qual o «melhor» reactor.

No momento presente, alguns tipos de reactores, dado o avanço técnico que a seu respeito se verifica, parecem favorecidos em relação aos restantes.

São eles o reactor do tipo Calder Hall, com urânio natural, grafite e arrefecimento por gás sob pressão, o reactor do tipo Shippingport, com urânio enriquecido em urânio - 235 e água sob pressão como moderador e como agente de transporte do calor e o reactor que serve de base ao programa do Canadá, com urânio natural e água pesada quer como moderador quer como agente de arrefecimento.

Não deve excluir-se, no entanto, a possibilidade de que outros reactores, de estrutura inteiramente diferente, venham a afirmar-se melhores reactores, no futuro.

Quanto à fusão nuclear? Que se passa no que se refere à utilização das reacções de fusão para a produção útil de energia?

Por enquanto o problema continua nos laboratórios de física nuclear, ou melhor, em laboratórios mixtos de física nuclear e de estudo das descargas eléctricas em tubos de gases rarefeitos.

A dificuldade em controlar essa forma de energia reside, antes de mais, na obtenção das temperaturas de muitos milhões de graus que são necessários para que a reacção se dê, quando se segue a via termonuclear que é a única que, aparentemente, poderá levar a resultados práticos.

Quanto tempo deverá decorrer, no entanto, até que seja possível produzir, em larga escala e de uma maneira controlada, energia a partir da fusão de núcleos de hidrogénio, não se afigura possível prever neste momento.

Como quer que seja, pode afirmar-se:

Com a descoberta da cisão do urânio e das formas de a utilizar para a produção industrial de energia, as nossas reservas de energia foram grandemente aumentadas. O aumento será bastante mais substancial, ainda, quando a fusão for adequadamente controlada.

Desde já se pode dizer, portanto, que não parece ilegítimo que se encare com optimismo o problema mundial da produção de energia.

Novos Vice-Reitor da Universidade Técnica e Director do Instituto Superior Técnico

No dia 18 de Março tomaram posse dos cargos de Vice-Reitor da Universidade Técnica e Director do Instituto Superior Técnico respectivamente os Profs. José Belard da Fonseca e Luís de Almeida Alves.

A *Técnica* apresenta-lhes as suas felicitações.

TEODOLITOS

CONSTRUÇÃO DR. H. WILD

DK 2
DKM 2
DKM 2-U
DKM 2-T

SÃO DE LONGE O QUE DE MELHOR SE FABRICA EM TODO O MUNDO!

Precisão inexcedível
Manejo facílimo
Construção robusta
A óptica mais luminosa

Aumento da luneta 30×, abertura da objectiva	45 mm
Focagem mínima a	1,4 m
Focagem máxima para leitura dos mm na mira	230 m
Idem para leitura dos cm	500 m
Constante de multiplicação 100, e de adição	0
Peso do equipamento com tripé extensível, sómente . . .	10,9 Kg

---

KERN & CIE. S. A. AARAU — Suíça

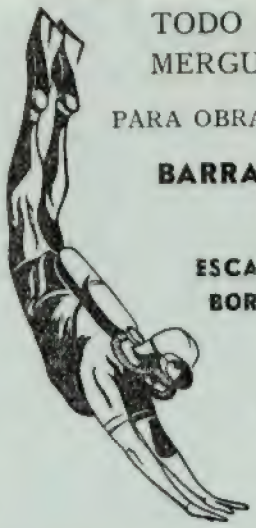
REPRESENTANTES

EMÍLIO DE AZEVEDO CAMPOS & CA. LDA.

RUA DE SANTO ANTÓNIO, 137-145 — PORTO — TEL. 20254/5
RUA ANTERO DE QUENTAL, 17-1.º — LISBOA — TEL. 53366

NOTA — Os teodolitos «KERN» não são aparelhos repetidores, mas sim teodolitos de círculo-duplo, oferecendo portanto maior precisão e um trabalho muito mais simples e mais rápido.

"COUSTEAU-GAGNAN"



TODO O MATERIAL DE MERGULHO AUTÓNOMO

PARA OBRAS DE:

BARRAGENS, PONTES PORTOS, ETC. ...

ESCAFANDROS, FATOS DE BORRACHA, LANTERNAS, BATÍMETROS, ETC.

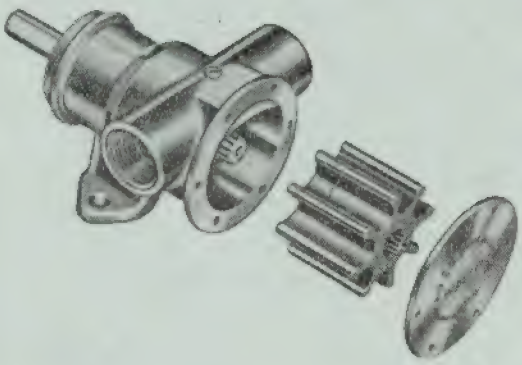
PEÇA O N/ CATÁLOGO

Um Exclusivo da

RUA DO CARMO, 21
LISBOA

Tel. 22797 — 24643

BOMBAS



Se há um problema de bombas consulte

VASCO PESSOA, LDA.

Rua da Boa Vista, 63 — LISBOA

J. B. FERNANDES & C.ª, L.DA

CASA FUNDADA EM 1781

Telefones P. P. C. 32591/5

Largo de S. Julião — LISBOA

Sempre em "stock" aos melhores preços:

— Tubos para água, galvanizados e pretos.
— » de aço sem costura para alta pressão.
— » » » » » » vapor.
— » » » para caldeiras.
— » » largos diâmetros para poços.
— » » cobre, latão, de aço inox.
— Acessórios para tubos.
— Chapa de aço inoxidável.
— » » ferro chumbado.
— » macia super-estanhada.
— » galvanizada, lisa e ondulada.
— » de alumínio ondulada para cobert.
— » » ferro, fina, média e grossa.
— » » » xadrez.
— » » metal Muntz para barcos.
— » » zinco e de chumbo.
— » » aluminio.
— » » cobre.
— » » latão.
— Folha de Flandres.
— Bronze fosforoso de fundição centrifugada em casquilhos e cavilhas.
— Bronze manganês para veios.
— Metal antifricção inglês.
— Arco galvanizado para vazilhame.
— Barramento de ferro em todos os perfis.
— Arco de tanoeiro.
— Arames vulgares, de ferro e zincados.
— Arames de aço inoxidável, de bronze, latão e cobre.
— Ferramentas «BELZER», nas mais modernas concepções para a indústria.
— Brocas, Mandris, Machos e Buchas marca «MAY».
— Solda de todos os tipos para metais ferrosos e não ferrosos.
— Cabos de aço e inoxidável.
— Correntes de ferro e de aço.
— Aparelhos diferenciais.
— Aparelhos eléctricos, de furar, ventoinhas, esmeriladoras, etc.
— Guilhotinas e saca-bocados.
— Macacos hidráulicos.

VASTÍSSIMO SORTIDO DE: FERRAMENTAS, AÇOS, FERRAGENS E METAIS

Lingotes de Bronze / Latão
Cobre-fósforo / Zinco / Estanho
Chumbo / Antimónio, etc.

CUTILARIAS DAS MELHORES MARCAS

ARTIGOS DOMÉSTICOS

C. D. U. 691.545

POZOLANAS, BETÕES COM POZOLANAS E CIMENTOS POZOLÂNICOS

PELO ENG.º CIVIL (I. S. T.) A. DE SOUSA COUTINHO
Investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

INTRODUÇÃO

Definição e propriedades gerais das pozolanas — As pozolanas são materiais siliciosos e aluminosos que, apesar de não terem só por si propriedades aglomerantes hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença da água, com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. (1)

O conhecimento destes materiais é antiquíssimo; a confecção das argamassas hidráulicas fez-se quase exclusivamente com pozolanas até aos princípios do século XIX, quando surgiu a invenção do cimento portland artificial por Louis Vicat em 1823. Depois desta invenção até apenas alguns anos as pozolanas foram um pouco esquecidas, pois todas as construções passaram a ser executadas com cais hidráulicas e cimentos artificiais dada a possibilidade e simplicidade da sua obtenção industrial, o que permitiu o prodigioso desenvolvimento da construção civil e das obras públicas neste último século e meio.

Actualmente começa-se a tomar de novo em consideração as curiosas propriedades das pozolanas, em virtude das exigências cada vez maiores impostas por certos tipos das nossas construções. Tem-se efectivamente reconhecido que o cimento portland possui determinadas propriedades indesejáveis para certos tipos de obras, procurando-se por isso modificá-las.

A propriedade mais inconveniente do cimento portland provém do alto valor do pH que é necessário manter no seio do cimento endurecido para que os seus componentes permaneçam inalterados. Valores do pH superiores a 12 são necessários para este fim e na natureza não ocorrem com frequência tais valores do pH. A lei inelutável do equilíbrio para que tendem todos os sistemas faz também tender o pH para 7, e a tal valor não há componente do cimento que seja estável.

A este facto junta-se ainda um outro de grande importância. Quando a reacção do ião $SO_4^{=}$ com os aluminatos do cimento portland se faz num meio de pH superior a 12, obtém-se um produto altamente expansivo que conduz à desagregação do betão. No entanto, quando esta reacção se faz em meio de pH inferior a este não há qualquer expansão.

Ora, precisamente uma das propriedades das pozolanas consiste em fazer descer o pH de equilíbrio dos componentes hidratados do cimento portland, de valores superiores a 12 para valores da ordem de 11 e outra em criar películas protectoras à roda dos componentes mais vulneráveis dos cimentos (cal, aluminatos, etc.), aumentando por isso a sua estabilidade, e concorrendo para a diminuição da corrosão do betão.

Outra propriedade importante do cimento portland, indesejável nas grandes construções macissas de betão é o facto da hidratação dos seus componentes, da qual resulta o aumento progressivo da resistência mecânica, ser uma reacção apreciàvelmente exotérmica. Nas grandes massas de betão a condutibilidade térmica é insuficiente para dissipar para o exterior o calor desenvolvido nos primeiros dias, o que provoca a subida da temperatura da massa de betão. À medida que o tempo passa a reacção exotérmica vai-se amortecendo gradualmente até que a quantidade de calor dissipado por condutibilidade térmica é maior do que a gerada no interior da massa de betão, e então a sua temperatura baixa. Como este abaixamento de temperatura se faz já com o betão no estado sólido, com as suas ligações ao exterior constituídas, geram-se tensões de tracção que podem originar a rotura da massa de betão.

Um dos meios de remediar este inconveniente consiste na utilização de pozolanas que contribuem para a resistência mecânica por meio de

reacções que não são tão exotérmicas como as de hidratação dos componentes do cimento portland.

Com a utilização de pozolanas consegue-se diminuir a temperatura de 15 a 30 % mantendo a tensão de rotura igual à obtida apenas com cimento portland.

A todas estas vantagens de carácter técnico é necessário adicionar ainda mais uma: a economia que resulta para o custo do betão quando se procede à substituição de parte do cimento por pozolana.

No caso das pozolanas naturais, ao custo reduzido da sua extracção e da sua moedura, há apenas a adicionar o do transporte, o qual, quando se faz por via marítima é bastante pequeno. No caso das pozolanas artificiais o seu custo é muito inferior ao do cimento, devido, não só ao facto da matéria-prima não necessitar dos tratamentos químico e físico que necessitam a matéria-prima deste, mas também da temperatura de cozedura ser de metade da dos cimentos, o que dá origem a um menor consumo de combustível (Cap. 2 e 6).

Daqui resulta que o custo da pozolana num estaleiro pode chegar a ser inferior ao do cimento, sendo vulgares os casos em que o seu preço é de $^1/_2$ a $^1/_3$ do custo do cimento, o que depende das distâncias relativas de transporte do cimento e da pozolana às regiões da sua utilização. Com efeito, nas regiões não produtoras de cimento e próximas de jazigos de pozolanas o custo daquele pode atingir valores duplos do seu preço na origem e é então que o emprego das pozolanas pode conduzir a vantagens económicas importantes, como acontece, por exemplo, nas Ilhas do Atlântico, excepcionalmente ricas em pozolanas, como veremos, e regiões importadoras de cimento. As grandes instalações portuárias do Arquipélago das Canárias fornecem um belo exemplo de obras extremamente económicas devido à aplicação inteligente de pozolanas.

Breve resumo histórico da descoberta das argamassas hidráulicas — A descoberta e a utilização das pozolanas anda ìntimamente ligada com a descoberta e a utilização racional do fogo e com a descoberta dos gessos de presa, cais e materiais cerâmicos. As afinidades das propriedades e do modo de obtenção de tais substâncias, e a continuidade da composição química entre as cais, cimentos, pozolanas e materiais cerâmicos, torna difícil separar a história da descoberta de umas da história da descoberta das outras.

O homem das primitivas civilizações empregava como principal material de construção o adobo — argila amassada com água, para lhe dar uma certa forma, e seca ao sol. Os tijolos de adobo obtidos eram colocados uns sobre os outros, a seco, ou com interposição duma delgada camada da mesma argila amassada com água. O material assim preparado não mostrava uma apreciável resistência à acção dos agentes atmosféricos, pois fàcilmente se desagregava por acção da chuva.

Não é difícil imaginar que o fogo utilizado pelo homem, em contacto com os tijolos de adobo, cozesse por vezes a argila e se observasse que se obtinha então um material muito mais resistente às intempéries.

Também não é difícil admitir que, ao apagar o fogo feito sobre rochas calcárias e gipsosas se verificasse que se obtinha um pó que a água da chuva depois tornava duro e resistente. Daqui talvez proviesse a ideia de empregar esse pó como material de ligação entre os tijolos ou pedras.

Foram talvez os egípcios os primeiros a utilizar racionalmente o fogo para a preparação dos materiais de construção, primeiro para aumentar a resistência do adobo seco ao sol aos agentes atmosféricos, e depois para produzir os materiais de ligação das alvenarias.

Os egípcios empregaram o gesso, (2) material abundante no seu país, que é transformado em ligante a temperaturas não muito elevadas. Os persas teriam utilizado já mais altas temperaturas, pois sabiam transformar o calcário em cal. Este conhecimento foi transmitido aos gregos e finalmente aos romanos.

Não é difícil agora compreender que pela cozedura do calcário umas vezes se obtivesse uma cal aérea, outras uma cal hidráulica e outras ainda um cimento, conforme a composição química do calcário de que se partia, o qual podia ser mais ou menos puro, até conter quantidades variáveis de argila.

Os ligantes assim produzidos eram misturados com areia, calhaus, fragmentos de tijolos ou telhas, etc. Por vezes ter-se-ia observado que com certas areias, de origem vulcânica ou resultantes da moagem de certos tijolos e telhas, se

obtinham produtos muito mais resistentes às águas do que com outras.

Os hindús usavam, e usam ainda hoje, [3] argamassas de cal e argila cozida e moída, «surki». Os gregos e os romanos utilizaram também este material e observaram que quando se misturava a cal com certas terras vulcânicas se obtinha o mesmo resultado.

Parece que a primeira pozolana natural empregada foi a terra da ilha de Santorin, pertencente ao arquipélago das Cíclades, ao norte da ilha de Creta, que pelo menos é a mais célebre de todas as pozolanas naturais e foi empregada em toda a zona do Mediterrâneo; os romanos descobriram os tufos vulcânicos da zona de Nápoles, e, mais tarde, após as suas conquistas na Europa, levaram a toda a parte o conhecimento das vantagens da utilização do tijolo moído, da telha moída e dos tufos vulcânicos, como os da região renana, na confecção das argamassas.

É bem conhecido o desenvolvimento que tiveram entre os romanos os ligantes hidráulicos. Vitrúvio, arquitecto do tempo de Augusto, no século I A. J. C. no tratado «De Architectura», dá uma ideia precisa das pozolanas: «Há um pó que efectua naturalmente coisas admiráveis; encontra-se nas regiões situadas em volta do monte Vesúvio; misturado com cal e com pedras contribui não só para a solidez dos edifícios ordinários mas também consegue endurecer debaixo de água, nos molhes que se constroem no mar». Vitrúvio atribui as excelentes propriedades deste pó à acção dos fogos subterrâneos e tenta-as explicar da seguinte maneira: «A acção dos fogos subterrâneos torna a terra leve e árida, privando-a de água; quando as três substâncias formadas do mesmo modo pela violência do fogo (cal, pozolana e pedras) se confundem numa única mistura, a presenca da água aglomera-as imediatamente e solidifica-as ràpidamente, sem que nem as ondas nem o esforço das águas as possam dissolver».

Esta explicação dum fenómeno pelo próprio fenómeno é a que podia ser dada naquela época e sòmente há um século foi possível dar uma explicação científica do fenómeno do endurecimento destas argamassas dentro de água.

A utilização dos materiais cerâmicos como pozolanas também é referida pelo próprio Vitrúvio, na mesma obra: «Misturando-se à argamassa de cal e areia do rio ou do mar, pedaços de materiais cerâmicos finamente moídos e passados por um peneiro, na proporção de uma parte para cada três, obter-se-á uma argamassa excelente».

Mais tarde, Séneca, o Filósofo, nas «Questões naturais», síntese das ciências do seu tempo e Plínio, o Antigo, na «História Natural» celebraram também as virtudes das terras das vizinhanças de Nápoles, mas dum modo mais poético do que científico.

Após a invasão dos bárbaros, a qualidade das argamassas começou a decair, e a tradição do fabrico das argamassas hidráulicas foi-se perdendo, pelo menos na maior parte da Europa.

A partir da Renascença a qualidade das argamassas foi melhorando e as necessidades da construção de então, necessidades que se foram desenvolvendo com o rumo que tomou depois a nossa civilização, fizeram voltar a atenção para os antigos processos de construção, dando uma maior voga à utilização das argamassas hidráulicas.

Breve resumo histórico da descoberta das causas da hidraulicidade — As argamassas hidráulicas usadas a partir da Renascença voltaram a ser constituídas por misturas de cal, pozolana natural ou material cerâmico moído, areia e água. Durante o século XVIII começou a fazer-se sentir a necessidade de uma explicação científica do fenómeno do endurecimento dentro de água, isto é, das causas da hidraulicidade, não só para se poder suprir a falta de pozolanas naturais, que não existem na maior parte das regiões, mas também porque a necessidade da explicação científica da natureza se estava impondo por toda a parte.

A discussão do fenómeno da hidraulicidade era sobretudo baseada no modo de fazer a extinção da cal. Havia certas receitas de extinção que conduziam, segundo os autores, à obtenção de verdadeiras argamassas hidráulicas. Julgava-se também que a excelente qualidade das argamassas hidráulicas dos romanos era devida a um segredo de extinção da cal que teria sido perdido. [2]

É fácil compreender que, numa altura em que a análise química não estava ainda criada, o conhecimento da natureza da matéria-prima fosse muito incompleto. Por isso, os autores das diferentes maneiras de extinguir a cal teriam razão quando declaravam que obtinham produtos com

certas propriedades, mas tais propriedades eram devidas à natureza da matéria-prima e não ao processo de extinção, o que não era, evidentemente, compreendido.

O primeiro a chamar a atenção para a importância da natureza da matéria-prima foi John Smeaton que, numa longa série de experiências em que variou a natureza da matéria-prima chegou à conclusão, em 1756, que a existência de argila no calcário era o mais certo índice da qualidade do produto obtido pela sua calcinação para obras hidráulicas. (4)

Pela mesma época, em 1786, um professor de química da Universidade de Montpellier, Chaptal, indicava o modo de obter pozolanas artificiais com tão boas propriedades como as pozolanas naturais de Itália, sugeitando as argilas ferruginosas à acção da temperatura. (5)

Explicava então Chaptal: «À superfície da terra encontram-se terras análogas a esta terra vulcânica de Itália, às quais não falta senão o terem sofrido a acção dum fogo violento, para não diferirem em nada delas. Creio que o fogo dos nossos fornos, mais activo que o dos vulcões, pois fàcilmente vitrifica enquanto o do vulcão apenas frita, pode substituir com vantagem a acção do vulcão». As melhores argilas, segundo Chaptal, são as vermelhas, insistindo este químico na influência vantajosa do elemento ferruginoso. Ele crê a tal ponto na veracidade desta acção que assegura ter melhorado as propriedades pozolânicas de certas terras amassando-as com óxidos de ferro.

Apesar dos dois erros de que enfermam estas afirmações, pois nem os tufos vulcânicos ou pozolanas naturais resultam da acção dos vulcões sobre as argilas, nem o elemento activo das pozolanas é o ferro, Chaptal fabricou verdadeiras pozolanas artificiais, tão boas como as pozolanas naturais de Itália.

Em 1780 o sábio sueco Bergmann ao analisar um calcário para fabrico da cal hidráulica encontrou alguns centésimos de manganésio, ao qual atribuiu as propriedades hidráulicas da cal. Graças ao prestígio do nome de Bergmann esta ideia foi aceite sem discussão, e por tal forma, que Guyton de Morveau em 1785 e mais tarde Saussure, tendo embora reconhecido, pela análise, que, de diversas rochas calcárias que davam origem a cais hidráulicas, todas continham argila, e, apenas uma só, manganésio — concluiram ser o manganésio a causa da hidraulicidade... Saussure, contudo, ainda junta tìmidamente, que a argila pode, em certa medida, substituir o manganésio, mas que lhe é bastante inferior. (6) Saussure explicava a acção da argila supondo que ela desempenhava o papel da pozolana, isto é, que por cozedura do calcário se obtinha uma mistura de cal viva e argila cozida não combinadas, opinião que, embora errada, foi aceite durante muito tempo, tendo chegado ainda aos princípios do século XX, nas ideias defendidas por Michaëlis.

Em 1813 o professor da Escola de Minas de Paris, Collet-Descotils, ao analisar calcários para a fabricação da cal hidráulica, observou que quando estes eram atacados pelos ácidos deixavam um resíduo de sílica insolúvel, ao passo que a cal hidráulica atacada pelos ácidos não deixava pràticamente nenhum resíduo de sílica.

Esta descoberta fundamental mostrava que *durante a cozedura tinha havido uma combinação da sílica com a cal.* Collet-Descotils atribuiu ao composto assim formado as propriedades hidráulicas da cal. Estava então aberto o caminho para a obtenção do cimento artificial.

Cabe a Louis Vicat a glória de ter compreendido perfeitamente as causas do endurecimento dos cimentos e das misturas de cal e pozolana na água, seguindo a linha de raciocínio que vinha de Smeaton e Collet-Descotils.

Com efeito, por meio de numerosas análises químicas mostrou que todas as cais hidráulicas provinham de calcários argilosos e que, recìprocamente, todos os calcários que continham uma proporção conveniente de argila podiam servir para a fabricação de cais hidráulicas. Compreendeu assim que, para se obterem ligantes hidráulicos ou cimentos não era necessário que a argila estivesse já *naturalmente* incorporada no calcário. *Misturando* argila com calcários finamente moídos e cozendo essa mistura, era possível obter, por outra via, *artificial,* o que naturalmente se obtinha pela cozedura dos calcários argilosos. Este facto fundamental levou Vicat à preparação dos cimentos artificiais, sendo por isso considerado o inventor do cimento portland artificial. Demonstrou assim, de uma maneira absoluta, que as propriedades hidráulicas da cal eram devidas exclusivamente à combinação da argila, destruindo completamente a teoria de Bergmann sobre o papel do óxido de manganésio.

Em 1819 Vicat terminava uma série de experiências com diferentes argilas ligeiramente calcinadas, da qual resultava de modo evidente que a presença do ferro não era necessária para a obtenção das propriedades pozolânicas; o óxido de ferro, em tais argilas, variava de 0 a 10 % e todas mostravam reactividade pozolânica acusada. (5)

Vicat observou também que, após esta calcinação moderada, as argilas eram mais fàcilmente atacadas pelos reagentes ácidos e alcalinos do que antes da calcinação e que no fim de uma calcinação intensa, os mesmos reagentes já não tinham acção.

Sendo já do seu conhecimento que a sílica e a alumina das pozolanas dissolvidas pela potassa cáustica podiam precipitar pela água de cal, que a argila antes da reacção com a cal, por cozedura do calcário, era insolúvel nos ácidos e que após a cozedura se tornava solúvel, era impossível não pressentir, como diz o próprio Vicat (5), «que a afinidade dos três elementos, cal, sílica e alumina era a causa imediata da solidificação progressiva e do estado final a que chegam estes componentes das argamassas hidráulicas conservadas dentro de água».

Generalizando portanto a observação de Collet-Descotils mostrou que os componentes da argila, sílica e alumina, formavam com a cal combinações que possuiam propriedades hidráulicas.

Como se sabe, das experiências de Vicat resultou duma maneira clara que o máximo de hidraulicidade era obtido quando a soma da percentagem de sílica com a de alumina era igual à percentagem de óxido de cálcio.

O holandês J. T. John, em 1819, ao ganhar o prémio oferecido pela Academia de Ciências Holandesa, descobria, independentemente, o mesmo que Vicat. A Academia tinha oferecido um prémio a quem descobrisse porque razão a cal obtida a partir das conchas de animais marinhos era inferior à obtida a partir de calcários naturais. A esta questão respondia John com a razão que 63 anos antes já tinha sido dada por Smeaton: as conchas dos moluscos não tinham argila, e os calcários naturais possuiam-na; juntando argila às conchas em proporção bem determinada antes da sua cozedura, obtinha-se um material com as propriedades dos produtos obtidos a partir dos melhores calcários.

O nome de cimento portland posto ao produto inventado por Vicat parece ter tido a sua origem na patente de Joseph Aspdin, registada em 1824 na Grã-Bretanha. Com efeito, o método de fabrico do cimento patenteado por J. Aspdin não é diferente do preconizado por Vicat, e o nome de cimento portland teria então nascido dum comentário de Smeaton de que o cimento por ele produzido era igual ao obtido a partir da melhor pedra de Portland, em solidez e durabilidade. (4)

Breve resumo histórico da descoberta dos componentes hidráulicos — Estabelecida a condição necessária para a obtenção de ligantes hidráulicos, o conhecimento dos compostos que determinam a hidraulicidade e o conhecimento das suas reacções com a água permaneceram ainda, durante quase todo o século XIX, obscuros até que Henry Le Châtelier, em 1887, os precisou.

A primeira ideia que explicava o endurecimento era a de que as modificações sofridas pelos calcários e pela argila durante o aquecimento consistiam principalmente na eliminação da água e do ar, e, quando a cal era colocada na água se recombinava com ela e com o ar, voltando outra vez ao estado sólido inicial. (4)

Se, sob o ponto de vista de fabricação do cimento, as ideias de J. T. John coincidiam com as de Vicat, já o mesmo não acontecia sob o ponto de vista da explicação do endurecimento, pois J. T. John admitia que a presa não era devida a qualquer reacção química, mas apenas a uma absorção da cal pela massa porosa da argila cozida (pozolana).

Berthier (6), em 1822, logo a seguir à publicação dos trabalhos de Vicat foi o primeiro a seguir um método científico para o estudo da hidraulicidade, começando a separar as variáveis que intervêm em tão complexo fenómeno. Assim, calcinava, no laboratório, misturas de sílica e de óxido de cálcio, com o fim de obter silicatos de cálcio; mas, devido à imperfeição das técnicas então em uso para a obtenção de altas temperaturas nunca conseguiu uma combinação completa, o que o levou a admitir que o composto formado era o silicato monocálcico.

Rivot (6), em 1856, depois de extensas investigações concluiu que se formava durante a cozedura um silicato tricálcico e um aluminato tricálcico, os quais, em contacto com a água se

hidratavam, fixando-a simplesmente, tal como acontece com o gesso.

Fremy [2], em 1865, quis verificar experimentalmente a exactidão da teoria de Rivot, tentando preparar o silicato tricálcico e o aluminato tricálcico no laboratório, mas, só poude preparar um aluminato de cálcio que endurecia na água. Quanto ao silicato, Fremy, realmente só conseguiu obter silicatos de cálcio que faziam presa em presença da água com um excesso de cal, comportando-se portanto como verdadeiras pozolanas.

O trabalho de Fremy contém a importante afirmação que o endurecimento do cimento portland e a reacção entre a cal e as pozolanas são processos da mesma natureza química.

Em 1887, Henry Le Châtelier [6] ao partir dos factos conhecidos precisamente naquela época e que eram a ocorrência, durante a cozedura do cimento e das cais hidráulicas, de combinações da cal com a sílica e com a alumina, combinações que davam origem a compostos com a propriedade de endurecer em contacto com a água, determinou rigorosamente quais eram esses compostos e como reagiam com a água.

O método por ele seguido consistiu na preparação sintética de cada um dos componentes, estudo das suas propriedades, considerados isoladamente, estudo das suas reacções com a água, verificação da sua existência no clinquer do cimento por meio do microscópio e verificação dos produtos da sua reacção com a água, no cimento endurecido, também por meio do microscópio.

Com efeito, Henry Le Châtelier preparou artificialmente, por fusão, os silicatos monocálcico, bicálcico e tricálcico; os dois primeiros não faziam presa debaixo de água e o terceiro, existente no cimento, onde aliás não parecia muito bem definido, tendia a decompor-se em contacto com a água eliminando parte da sua cal. Era este, segundo Henry Le Châtelier, o principal elemento de hidraulicidade do cimento.

A importância desta afirmação é grande, pois deve notar-se que mesmo Le Châtelier não obteve o silicato tricálcico e os produtos da sua reacção com a água, dum modo preciso: os compostos formados não eram bem definidos, e daí a variabilidade das composições atribuidas por Berthier e Rivot. Com efeito, o silicato tricálcico vai sempre cedendo cal à água em contacto com a qual está, até se reduzir a sílica pura. Veremos, no § 10, as razões deste fenómeno: é que a reacção do silicato tricálcico com a água, para dar um composto com propriedades hidráulicas, tem de ser realizada num meio saturado de hidróxido de cálcio, de pH = 12,34, a 20° C.

Juntamente com os silicatos aparecem os aluminatos, bicálcico e tricálcico, com uma importância secundária para as acções hidráulicas; Henry Le Châtelier afirmou que o aluminato tricálcico ao reagir com a água fixa uma molécula de cal, passando a tetracálcico, tal como hoje ainda se admite.

Os silicatos e os aluminatos hidratando-se formam soluções sobresaturadas, das quais precipitam no estado cristalino, e é desta precipitação que resulta o fenómeno da passagem ao estado sólido do conjunto da argamassa.

Pela mesma época em que Henry Le Châtelier fazia estas afirmações, e até mesmo durante o princípio do século XX, Michaëlis admitia, como J. T. John, que o único elemento hidráulico de qualquer produto hidráulico artificial ou natural era a sílica, que, em presença da cal, se comportaria como um corpo colóide, expandindo-se e absorvendo a água e a cal, o que determinaria o endurecimento. É o mesmo fenómeno que se observa com a pele dos animais que, fixando nos seus poros o tanino, solidifica e torna-se capaz de ter resistência.

Desde o tempo de John até Le Châtelier as teorias da presa e endurecimento dos cimentos e das argamassas de cal e pozolana oscilaram entre a ideia da formação de novos compostos químicos, e a de uma acção independente da argila sobre a cal. Esta última ideia era tão forte que prevaleceu até aos princípios do século XX, ideia defendida sobretudo por Michaëlis, até 20 anos após a publicação da teoria de Le Châtelier, baseada em dados rigorosamente científicos. É curioso ainda registar que, em 1885, um neto do inventor do cimento, Louis Vicat, chamado Merceron-Vicat, adepto das teorias de John e Michaëlis, julgando seguir a via traçada por seu avô, mas que estava infelizmente num polo oposto pois era incapaz de seguir e aplicar um método científico às suas observações, menosprezava os trabalhos dum Rivot, dum Fremy e dum Le Châtelier [7], dizendo que eles seguiam vias completamente inaceitáveis que não eram as seguidas na fabricação industrial dos cimentos, pois, fechados nos seus laboratórios, faziam misturas de cal, sílica

e alumina, que fundiam num forno de laboratório o que, segundo ele, nada tinha de comum com a realidade industrial... Ignorava o neto do ilustre Vicat que estes químicos, ao trabalharem no laboratório reproduziam aí a realidade que tinham observado na indústria, parcelada, separada e decomposta nos seus parâmetros fundamentais, como era preconizado pelo mais sólido pensamento cartesiano.

Essa crítica, que Merceron-Vicat expõe no Congresso da Associação Francesa para o Avanço das Ciências, em 1885, termina pela admissão da hipótese de que o cimento é, em última análise, uma mistura de cal e de argila gelatinosa, a qual, em contacto com a água formaria um esqueleto que se tornaria duro e resistente por secagem, enquanto a cal se carbonatava, teoria que, aliás, não resiste à mais ligeira análise química.

O trabalho de Henry Le Châtelier constitui hoje a base da química dos cimentos, um aspecto da qual é apresentado no Capítulo 3 sobre as reacções da pozolana com o hidróxido de cálcio, nada mais restando acrescentar sobre a legitimidade das suas hipóteses, que têm resistido a mais de 70 anos de descobertas e inovações posteriores.

PARTE I

PARTE GERAL SOBRE A REACTIVIDADE POZOLÂNICA

CAPÍTULO 1

DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS PRINCIPAIS TIPOS DE POZOLANAS

1. Classificação das pozolanas. — As pozolanas dividem-se em três grandes grupos: naturais, artificiais e subprodutos industriais.

As pozolanas naturais são constituídas por rochas que só por si têm propriedades pozolânicas, não tendo necessidade de qualquer tratamento especial, a não ser, eventualmente, uma moedura.

As pozolanas artificiais são derivadas de certas rochas que submetidas a um tratamento térmico adequado ficam com propriedades pozolânicas importantes.

Certos subprodutos industriais têm propriedades pozolânicas, como as cinzas volantes, o si-stoff, etc.

A seguir vão ser indicados os principais tipos de pozolanas destes três grupos, que hoje se conhecem.

2. Principais tipos de pozolanas naturais. — As pozolanas naturais são constituídas por rochas vulcânicas lávicas*: cinzas vulcânicas, soltas ou consolidadas em tufos vulcânicos, com vários graus de alteração pelos agentes atmosféricos. São as lavas ácidas e neutras, desde os riolitos aos andesitos que, com maior frequência, produzem pozolanas, mas conhecem-se também pozolanas constituídas por tufos basálticos alterados (8), como os da ilha de Porto Santo, e por lavas subsaturadas ou básicas ricas em álcalis, como as leucitites (pozolanas romanas) e hauynites (pozolanas do grupo do Volturno). As pozolanas provenientes de lavas ácidas são porosas, pouco densas e claras como as da ilha de Santo Antão (Cabo Verde) e as provenientes de lavas básicas são escuras e compactas, como as da ilha de Porto Santo.

As pozolanas naturais mais conhecidas são:

Trass — Tufo traquítico alterado em que a maior parte dos minerais constituintes está profundamente alterada, hidratada e decomposta. Quando observado ao microscópio em secções delgadas mostra ser constituído por uma massa de fundo, isotrópica, com cristais de hornblenda, biotite e augite, e por fragmentos do traquito inicial não alterado. (1)

Pozolanas italianas (1)

a) *Grupo romano ou lacial* — Leucitites alteradas, mostrando muita massa amorfa, com cristais de leucite mais ou menos alterados, augite e mica branca. Cinzentas a vermelho acastanhadas.

b) *Grupo napolitano ou flegreano* — Tufos traquíticos, constituídos por uma massa isotrópica com muitos microcristais de sanidina, pequenas porções de plagioclase, augite e magnetite. Con-

* Para a classificação destas lavas, ver o Apêndice I.

têm muito material pulverulento verde amarelado com pequenos cristais de feldspatos, magnetite e piroxenas [1]. Mais ricas em sílica e em álcalis que as anteriores e mais pobres em cal e magnésia.

c) *Grupo do Volturno* — São idênticas às do grupo romano, mas têm hauyna em vez de leucite. São pois rochas subsaturadas ou básicas.

Terra de Santorin — Obsidianas (que são riolitos), e tufos provenientes das obsidianas alteradas, constituindo um material granular isotrópico misturado com fragmentos de feldspatos cristalinos, piroxenas, quartzo, etc.

Pozolanas usadas nos E. U. A. [9] — Tufos riolíticos, com 70 a 76 % de sílica e possuindo um teor de vidro de 50 a 100 %. Os restantes constituintes são quartzo, feldspato, biotite, hornblenda, hiperstena, sanidina, calcite, pequenas porções de opala e de argilas montmorilloníticas.

Pozolana de Santo Antão (Cabo Verde) — Tufo vulcânico muito provàvelmente andesítico proveniente da deposição de cinzas vulcânicas e sua ligeira consolidação, e intensamente alterado por erosão. Altamente poroso, de cor clara. Abundante em material vítreo, com cristais de sanidina e albite; contém magnetite, biotite, calcite e clorites.

Pozolanas dos Açores — Encontram-se no Arquipélago dos Açores, lavas de todas as composições e acidez, desde os traquitos até aos limburgitos [10] [11] aparecendo os andesitos e basaltos com certa frequência. Pozolanas de reactividade extremamente variável, desde as fortemente reactivas até às fracamente reactivas. Encontram-se sob a forma de rochas pulverulentas.

Pozolanas da ilha de Porto Santo — Provàvelmente rochas de tipo basáltico, muito alteradas.

Pozolanas das ilhas Canárias — Tal como nas outras ilhas do Atlântico encontram-se lavas de todas as composições, desde as obsidianas aos limburgitos [67]. As melhores pozolanas são os tufos traquíticos que aparecem ao sul da ilha de Tenerife, com aspecto semelhante aos tufos da ilha de Santo Antão, mas muito mais consolidados, o que lhes dá maior compacidade e resistência mecânica (da ordem de 30 kg cm^{-2} à compressão). Tais tufos são usados como blocos para a construção *(canto blanco)*, e, quando moídos produzem excelentes pozolanas usadas em todas as importantes obras portuárias do arquipélago. [12]

Pozolanas francesas [13] — Tufos traquíticos que se encontram no Maciço Central Francês na região de Auvergne e nas suas ramificações periféricas. Aparecem na cadeia dos Puys, a oeste de Clermont-Ferrand, em camadas que chegam a atingir 50 m de espessura. As mais exploradas são as do alto Loire, Lozère, Cantal, Ardéche e outros departamentos do litoral mediterrânico até Agde.

Em França, as pozolanas são utilizadas sobretudo na fabricação de betões leves, pois as escórias vulcânicas com reactividade pozolânica aparecem sob a forma de rochas fragmentadas, com dimensões desde alguns centímetros até às de pó, e com resistência mecânica relativamente elevada, o que permite utilizá-las como «inerte» para fabrico de betão; por este facto, não nos deteremos sobre estas pozolanas pois as suas aplicações saiem fora do âmbito deste artigo.

3. Principais tipos de pozolanas artificiais

3.1 — Rochas siliciosas

Gaize — Rocha branda, porosa, com 1,4 de densidade, de origem sedimentar, constituída essencialmente por sílica amorfa no estado gel, com certa percentagem de argila, e que é derivada muito provàvelmente, como a bauxite, da glaucónia (sílico-aluminato férrico-magnesiano) pela acção do ácido sulfúrico proveniente da oxidação das pirites [2] [14] [15]. Encontra-se nas Ardenas e no vale do Mosa. As suas propriedades pozolânicas são muito exaltadas pela torrefacção a 900° C.

Diatomite [2] [16] — Rocha sedimentar formada pela deposição de carapaças siliciosas de diatomácias, radiolários, etc. É constituída essencialmente por sílica hidratada, muito reactiva com a cal depois de sujeita à acção da temperatura entre 500 e 900° C.

Há jazigos no nosso país, na Itália, Canadá, E. U. A., Algéria, Dinamarca (onde toma o nome de moler) e Alemanha (onde toma o nome de kieselgühr).

Silex e opala — Sílica hidratada no estado gel, cujas propriedades pozolânicas são manifestadas pela acção da temperatura.

3.2 — Rochas argilosas (sílico-aluminosas) [8] [17]

— Os minerais argilosos que dão origem a pozolanas quando aquecidos a temperaturas variáveis

de 500 a 1000° C são principalmente os dos grupos da caulinite, da montmorillonite e da ilite *.

Como caso particular destas rochas argilosas, citaremos o «surkhi», que é constituído por ladrilho ordinário moído, que se usa na Índia. (3)

3.3 — **Rochas aluminosas** — A rocha deste grupo que se conhece como boa pozolana é a rocha argilosa constituída pelo grupo dos óxidos e hidróxidos de alumínio (bauxite). Le Châtelier encontrou argamassas feitas de bauxite e cal nalgumas ruinas romanas, em Baux, no vale do Ródano. Ferrari afirma também que as bauxites dão excelentes pozolanas (2).

4. Principais tipos de pozolanas constituídos por subprodutos industriais

Si-stoff (2) — Subproduto silicioso resultante da fabricação do alúmen (sulfato duplo de alumínio e potássio). O alúmen obtém-se pela acção do ácido sulfúrico sobre as argilas e outros silicatos. É uma pozolana bastante reactiva mas tem o inconveniente de ter um elevado teor em anidrido sulfúrico.

Cinzas volantes (18) — Resíduo da combustão do carvão pulverizado que fica nos despoeiradores dos fumos. Constituídas por partículas esféricas vítreas, provenientes da argila do carvão, por partículas esféricas negras, de magnetite, provenientes do ferro das pirites do carvão e contendo ainda, por vezes, partículas de carvão incompletamente queimado. A composição química é evidentemente variável. Aproxima-se da composição duma argila cozida com muita alumina e óxido de ferro. Contém às vezes substâncias combustíveis, de 1 ou 2 % até 20 ou 30 %.

O componente principal é vidro, com quartzo e mullite (§ 7.1) como principais componentes cristalinos.

Cinzas provenientes da destilação das pedras betuminosas (19) — Os resíduos da destilação de pedras betuminosas, que são cinzas constituídas por argilas desidratadas, têm propriedades pozolânicas e como tal são empregadas, dando-se assim consumo a uma quantidade enorme de subprodutos industriais. São empregados em França como inertes para betões leves, exactamente como as pozolanas naturais a que já nos referimos. Também são usados na fabricação do cimento portland, como correctivo da matéria-prima.

A sua aplicação sai também fora do âmbito deste artigo e por isso não nos deteremos sobre estes produtos.

CAPÍTULO 2

CAUSAS DA REACTIVIDADE POZOLÂNICA

5. Reactividade das pozolanas. — Por reactividade das pozolanas entende-se a sua capacidade para se combinarem quer com o hidróxido de cálcio, quer com os constituintes do cimento hidratado.

Sendo esta reacção química realizada no estado sólido, ou pelo menos com um dos reagentes — a pozolana — neste estado, ela só é possível se os reagentes não estiverem no estado cristalino. Com efeito, a interdifusão de duas fases sólidas e as reacções químicas neste estado seriam impossíveis se as substâncias em presença tivessem todos os seus átomos nas posições de energia potencial mínima dentro dum esquema perfeitamente ordenado e simétrico, com todas as ligações saturadas. (20) O papel desempenhado pelo estado amorfo e pelos defeitos e excepções do arranjo cristalino, ordenado e simétrico, dos átomos, é pois fundamental no valor duma pozolana.

A reactividade das pozolanas está portanto ligada à sua constituição interna: ela será tanto maior quanto mais afastado estiver o produto da estrutura cristalina. Nas pozolanas naturais é sobretudo o estado amorfo que predomina, em virtude do arrefecimento brusco das lavas e da alteração subsequente pelos agentes atmosféricos que tende a destruir os raros cristais que se conseguiram formar durante o arrefecimento brusco do magma. Nas pozolanas artificiais conseguem-se obter defeitos de estrutura por meio da acção da temperatura, como veremos mais adiante, desde que esta não seja suficientemente intensa para provocar novo arranjo cristalino, fundindo o material.

Outra propriedade fundamental que as pozolanas devem possuir para terem alta reactividade é uma grande superfície por unidade de volume, isto é, estarem num grau de extrema divisão, contendo quase exclusivamente partículas de dimensões inferiores a algumas dezenas de mícrons.

* Para a classificação das rochas argilosas, ver o Apêndice IV.

6. Causas da reactividade das pozolanas naturais. — A observação microscópica das pozolanas naturais mostra que elas são constituídas por cristais de minerais fàcilmente reconhecíveis, por uma massa vítrea, isotrópica, provàvelmente amorfa, ou, quando muito, submicrocristalina, e ainda por uma substância resultante da alteração pelos agentes atmosféricos desta massa vítrea, com um carácter de gel, extremamente porosa e com enorme superfície interna. (1) (21)

Mostra a experiência que são a parte vítrea e sobretudo a porção alterada desta parte vítrea as responsáveis pela reactividade pozolânica. Os cristais não têm qualquer reactividade, possuindo contudo a sua parte alterada alguma reactividade pozolânica.

As notáveis observações de G. Gallo, (22) em 1908, sobre a relação entre a estrutura microscópica das pozolanas naturais e a sua reactividade levaram à conclusão que, de facto, quanto maior é a percentagem de cristais duma pozolana, menor é a sua reactividade. As boas pozolanas são constituídas quase essencialmente por uma massa granulosa, amorfa, indicativa de profunda alteração, inactiva à luz polarizada, mas contendo por vezes alguns cristais.

Pelo contrário, as pozolanas fracas ou inactivas apresentam uma estrutura totalmente diferente, essencialmente cristalina.

Heider (22) conseguiu separar, por levigação em água, a pozolana designada por terra de Santorin em três partes com características diferentes: uma, constituída por 20 % do total, composta por pedra-pomes, que flutua na água; outra, em igual quantidade, constituída por areia finíssima, negra ou vermelha, composta essencialmente por obsidiana; a parte restante, ou seja 60 % constituída por um pó fino, cinzento. As duas primeiras partes, misturadas com água e cal não fazem presa, e a última, que ao microscópio aparece granulosa e amorfa, é que tem altas propriedades pozolânicas.

Santarelli (23) observou também uma diminuição da reactividade pozolânica desde a base até à parte superior dos depósitos de pozolanas italianas, e uma maior abundância de constituintes cristalinos nos materiais de origem mais recente. As cinzas das recentes erupções do Vesúvio, de composição química semelhante às das mais antigas, mostram pequeníssima reactividade pozolânica.

As melhores pozolanas são as que derivam de magmas ácidos, e as de menor reactividade são as de magmas básicos, o que é explicado pelo facto da natureza química do magma influenciar fortemente a velocidade do seu arrefecimento. (25)

Os magmas básicos são muito fluidos, a erupção é portanto tranquila e a lava pode arrefecer em condições de cristalizar. Pelo contrário, os magmas ácidos, com grande percentagem de silicatos, são muito viscosos, pelo que oferecem grande dificuldade à saída dos gases, cujo aumento de pressão determina grandes explosões, nas quais os materiais fundidos são lançados para o ar pulverizados, e solidificando-se com enorme rapidez, o que dá origem à formação dum aerogel *.

A condição essencial para que um magma produza uma pozolana é portanto que ele solidifique ràpidamente em contacto com o ar. Os magmas solidificados em profundidade com a mesma composição química das lavas ou das cinzas vulcânicas não têm qualquer reactividade pozolânica.

Após a solidificação da lava é ainda necessário que esta sofra a acção dos agentes atmosféricos, que lhe eliminam parte dos álcalis, e promovem a fixação da água de combinação. Por este facto alguns autores medem a intensidade da alteração pela quantidade da água de combinação existente na pozolana.

As propriedades pozolânicas das lavas dependem pois essencialmente do seu estado físico e não da sua composição química.

Estas ideias são confirmadas pelas experiências de Parravano e Caglioti (24) que fundiram e solidificaram rápidamente piroxenas. Estas, que inicialmente não possuiam reactividade pozolânica, passaram depois deste tratamento a exibi-la.

No decurso deste trabalho veremos efectivamente que as pozolanas naturais provenientes de magmas ácidos, como as de Santo Antão (Cabo Verde) têm uma reactividade inicial extremamente elevada, medida pela resistência à compressão e à flexão de pastas de cal e pozolana, mas que aumenta muito pouco com a idade

---

* Ver o Apêndice III.

(altas tensões de rotura das pastas de cal e pozolana a 7 dias e a 28 dias, e pequeno aumento até 1, 3 ou 5 anos) (§ 29.3).

Mas há também pozolanas derivadas de magmas básicos, como as italianas, o «trass» e a de Pedras Pretas (Porto Santo) que têm fraca reactividade nas primeiras idades mas apresentam em idades superiores a 1 ano uma alta reactividade, revelada por altas tensões de rotura das pastas de cal e pozolana, superiores mesmo às obtidas com as pozolanas ácidas (§§ 30, 32 e 33). Certo é que há outras pozolanas básicas que apresentam sempre baixa reactividade, como as pozolanas da Vigia, Lombas ou Balditoro, da ilha de Porto Santo (§ 30). Portanto, as ideias acabadas de apresentar sobre as relações entre a natureza do magma e a qualidade da pozolana devem ser tomadas como explicando a origem das pozolanas de alta reactividade inicial, pozolanas que, veremos no decurso deste trabalho (Capítulos 8 e 9), parecem ter as melhores qualidades, como por exemplo as pozolanas de Santo Antão.

7. Causas da reactividade das pozolanas artificiais. — As pozolanas artificiais resultam da calcinação dos minerais siliciosos e argilosos já referidos (§ 3). As causas da reactividade das pozolanas artificiais não são actualmente ainda bem conhecidas, sobretudo devido à incerteza da constituição dos minerais donde derivam e das transformações que estes sofrem pela acção da temperatura.

A temperatura de 500° C para a caulinite (§ 7.1) ou mais baixa ainda para outros minerais argilosos, pode ser tomada como o ponto a partir do qual se começam a manifestar propriedades pozolânicas, enquanto para além de 900 a 1000° C a reactividade se torna menor e começa a desaparecer.

Dum modo geral, a acção da temperatura sobre os minerais argilosos pode ser esquematizada do seguinte modo:

Primeiro dá-se a evaporação da chamada água livre (de molhagem) até uma temperatura que se pode fixar entre 100 e 150° C. Além de 150° C liberta-se a água adsorvida e a água zeolítica, que está entre os planos da rede cristalográfica ou adsorvida nestes planos; em seguida, a uma temperatura que depende da natureza da argila, como veremos a seguir, elimina-se a água combinada, ligada quìmicamente, por ligações covalentes, na rede cristalina, aos átomos de silício, alumínio e oxigénio do mineral. Nestas condições as ligações destes átomos aos iões OH^- e H^+ ficam livres, e, se o mineral estiver primitivamente no estado cristalino, o cristal passa a apresentar defeitos, ligações por saturar que ficarão com grande afinidade para outros radicais, como para os ácidos ou básicos e para os catiões dos metais alcalinos e alcalino-terrosos.

Esta saída dos iões H^+ e OH^- é acompanhada por uma contracção irreversível da rede cristalina do mineral, contracção que se dá na direcção normal aos planos cristalográficos, isto é, no eixo 001.

Mas, à medida que a temperatura se eleva acima de 700 ou 800° C começa a desintegração da rede cristalina do mineral dando-se outro arranjo atómico em virtude da maior mobilidade dos átomos a tais temperaturas. Os átomos que não tinham as suas ligações completamente saturadas, por terem perdido iões H^+ e OH^-, tendem agora a sofrer novo arranjo em resultado da tendência para a formação de superfícies com energia potencial mínima; daqui resulta uma perda de reactividade pozolânica a qual começa a desaparecer acima de 1000° C depois do mineral ter adquirido uma nova rede cristalina.

É este mecanismo puramente físico que explica a criação e o aumento da reactividade duma pozolana com a temperatura, e depois a perda da reactividade quando a temperatura de cozedura é muito elevada (§§ 40, 41 e 42).

Parece ter sido Fremy o primeiro a relacionar o desenvolvimento das propriedades pozolânicas das argilas com a temperatura à qual se dá a perda de água quìmicamente combinada.

O fenómeno da perda de reactividade às temperaturas elevadas foi primeiramente observado por Guyton de Morveau em 1805 [5], quando este notou, durante a fabricação de pozolanas, que a argila cozida em contacto com o carvão perdia as suas propriedades pozolânicas. Vicat explicou o fenómeno dizendo que o ferro da argila passava ao estado de protóxido, combinando-se com a sílica para formar um protosilicato de ferro, que é inerte, explicação que, como se vê, está bastante longe de corresponder aos fenómenos actualmente conhecidos.

Pode afirmar-se que a reactividade pozolânica

máxima se atinge precisamente no período em que se liberta toda a água combinada, ligada quìmicamente, e se começa a obter a modificação da rede cristalina.

As temperaturas a que estas transformações se dão dependem contudo dos minerais argilosos, conforme se verá a seguir, com mais detalhe.

Se é certo que este esquema é perfeitamente adaptável à diatomite e ao caulino (§§ 40 e 41, figs. 32 e 35) já o mesmo se não pode dizer dos outros materiais argilosos (§ 42, fig. 38). Com efeito, quando a reactividade destes materiais argilosos é medida pelas resistências à compressão e à flexão de pastas confeccionadas pela mistura destes com cal, as tensões de rotura obtidas nas idades jovens sugerem que efectivamente os fenómenos se passam como se disse, mas nas idades avançadas, de 1 ano e mais, a reactividade medida pela resistência das pastas cresce sempre com a temperatura, pelo menos até 1000° C. Para argilas cozidas a temperaturas superiores à temperatura crítica definida nas idades jóvens pelo ensaio de resistência das pastas de cal a reactividade sobe imenso com o tempo, tal como se se tratasse das pozolanas básicas referidas no parágrafo anterior, enquanto as argilas cozidas a temperaturas inferiores a esta não manifestam tal aumento na reactividade. Este comportamento leva pois a pensar que os fenómenos não são tão simples como, em esquema, se descreveram.

7.1. Acção da temperatura sobre os minerais do grupo da caulinite. — A fórmula estrutural dos minerais deste grupo é [26] (vêr Apêndice IV):

$$(OH)_8\,Si_4\,O_{10}\,Al_4$$

e a composição teórica expressa em óxidos é,

SiO_2	—	46,54%
O_3Al_2	—	39,50%
OH_2	—	13,96%.

Os principais minerais deste grupo são: a caulinite, dickite, nacrite, metahalloysite (halloysite desidratada), com a fórmula estrutural indicada mais acima e com uma composição que se pode representar pela fórmula química, [27]

$$O_3\,Al_2\,.\,2\,SiO_2\,.\,2OH_2$$

a anauxite cuja composição química pode ser escrita:

$$O_3Al_2\,.\,3\,SiO_2\,.\,2OH_2$$

e a halloysite, cuja fórmula estrutural também é idêntica à geral, apresentando contudo quatro moléculas de água; a sua composição química pode ser escrita assim

$$O_3Al_2\,.\,2\,SiO_2\,.\,4OH_2\,.$$

Trata-se pois de silicatos de alumínio hidratados. Derivam da alteração dos feldspatos alcalinos, ácidos (da família das ortoclases) pela acção dos agentes atmosféricos em particular da água carregada de anidrido carbónico, isto é, provém da alteração dos feldspatos alcalinos em meio ácido. Também se podem formar a partir das rochas ígneas básicas, com quantidades importantes de magnésio se a acção meteorisante se dá em zonas em que a circulação da água é intensa, com boa drenagem que permita a saída do magnésio. [26]

A dickite, a nacrite e a anauxite são componentes raros das argilas.

Quanto mais defeituosa é a estrutura do mineral mais baixa é a temperarura a que se faz a desidratação. O mineral que se desidrata a mais baixa temperatura é a halloysite (550° C) vindo em seguida a caulinite (583° C) e finalmente a dickite (680° C) (fig. 1) que mostra a mais bem organizada estrutura dos minerais deste grupo. [8] [27] [28]

Assim, considerando o aquecimento da caulinite, verifica-se que a água começa a sair progressivamente entre 300 e 500° C.

A 500° C começa a dar-se a destruição da rede cristalina do mineral, a qual é completa a 583° C. A saída da água é ainda acompanhada por um efeito endotérmico de 95 a 100 cal g^{-1}. A substância que se obtém pelo aquecimento a esta temperatura é o metacaulino.

O metacaulino é pràticamente amorfo; os resultados dados pela análise aos raios X são demasiadamente obscuros para darem qualquer resposta conclusiva sobre a questão do estado do metacaulino. Admite-se que ele é constituído por uma mistura íntima de sílica e de alumina, talvez à escala atómica, e portanto, pràticamente, uma solução sólida. [1] [9] [27]

Continuando o aquecimento, entre 900 e 950° C dá-se uma reacção exotérmica que se supõe devida à conversão da alumina na forma cristalina γ, libertando-se sílica com alguma alumina ainda em solução sólida.